

**VŠB - Technická univerzita Ostrava**

**Fakulta elektrotechniky a informatiky**

**Katedra měřicí a řídicí techniky**

**Stanovení optimálních parametrů  
pro laboratorní vyšetření rovnovážného aparátu**

Assesment of Optimum Parameters for a Vestibular System  
Diagnostic

**Ostrava 2011**

**Bc. Soňa Kutá**

## **Prohlášení**

*Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně.*

*Uvedla jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpala.*

.....

*Bc. Soňa Kutá*

*Datum odevzdání diplomové práce: 6.5.2011*

## **Poděkování**

Chtěla bych touto cestou velmi poděkovat mé vedoucí diplomové práce paní Ing. Jitce Mohylové Ph.D. za cenné rady, konzultace a připomínky spojené s vypracováním mého úkolu.

Zároveň bych ráda poděkovala paní MUDr. Evě Mrázkové Ph.D. a paní Ing. Martině Litschmannové, bez kterých by nebyla možná realizace mé diplomové práce.

## **Abstrakt**

Poruchy rovnováhy jsou závažným zdravotním problémem a výrazně snižujícím kvalitu života člověka. Při odborném vyšetřování pacienta s podezřením na poruchu funkce rovnovážného ústrojí je důležitá anamnéza a testování komplexu podílejícího se na držení rovnováhy - rovnovážný aparát vnitřního ucha, vizuální centrum, propioceptivní a somatosenzorické vstupy smyslových orgánů. Existuje mnoho vyšetřovacích metod, např. zkouška chůzí, Rombergova zkouška (subjektivní vyšetřovací metody) a posturografie (objektivní vyšetřovací metody). Tato diplomová práce je zaměřena na optimalizaci diagnostiky a možnosti optimalizace vyšetřovací metody založené na statistické analýze naměřených dat z posturometrické plošiny Otometrics.

## **Klíčová slova**

Rovnováha, rovnovážné ústrojí, posturometrie, posturometrická plošina, vyšetření rovnováhy, COP, COG, COM, Otometrics

## **Abstract**

Disturbance of balance is a serious health problem and significantly reduces the quality of human life. When investigation of a patient suspected of imbalance is an important anamnesis and testing of complex which is involved in keeping a balance - balance apparatus of the inner ear, visual, somatosensory and proprioceptive sensory inputs. There are many investigative techniques, such as walking test, Romberg test (subjective diagnostic methods) and posturography (objective diagnostic methods). This diploma thesis is focused to the optimization of patient diagnostics and possibilities of the diagnostic method based on statistics data analysis improvement. The posturometric data are measured with the Otometrics balance platform.

## **Key Words**

Postural stability, balance systém, posturometry, balance platform, balance testing, COP, COG, COM, Otometrics

## Seznam použitých symbolů a zkratek

Ad, Dv1, Dv2, Ha1, No	označení zdravých pacientů
ANOVA	analysis of variance
Ba1, Ba2, Du, St1, St2	označení nemocných pacientů
COG	center of gravity
COM	center of mass
COP	center of pressure
d	délka
Dp.	dioptrie
$f(x)/\varphi$	hustota pravděpodobnosti
$F(x)/\Phi$	distribuční funkce
Fx, Fy, Fz	síly
$H_0$	nulová hypotéza
$H_A$	alternativní hypotéza
K-W	Kruskall-Wallis test
LED	Light-Emitting Diode
LOS	Limits of stability
mCTSIB	modified Clinical Test of Sensory Interaction and Balance
Mx, My, Mz	momenty sil
nHL	normal Hearing Level
P	pravděpodobnost
p-hodnota/p-value	hladina významnosti, při které $t_{krit} = x_{obs}$
QRS	označení vln křivky srdečního rytmu
SCM	musculus sternocleidomastoideus

$t$	čas
$T(X)$	testovací kritérium
$t_{krit}$	kritická hodnota
USB	Universal Serial Bus
V	obor přijetí
$v$	rychlost
VEMP	Vestibular Evoked Myogenic Potentials
VNG	videonystagmografie
VOR	vestibulo-okulární reflex
VSR	vestibulo-spinální reflex
W	kritický obor
$x$	vektor souřadnic COP na ose x (l $\square$ vopravý posun)
$\hat{x}$	modus
$x_{0.5}$	medián
$x_N$	matice souřadnic x všech nemocných pacientů
$x_{obs}$	pozorovaná hodnota
$x_p(z_p)$	kvantily
$x_Z$	matice souřadnic x všech zdravých pacientů
$y$	vektor souřadnic COP na ose y (předozaďní posun)
$y_N$	matice souřadnic y všech nemocných pacientů
$y_Z$	matice souřadnic y všech zdravých pacientů
$\alpha(\square)$	hladina významnosti
$\alpha_3$	šíkmost
$\alpha_4$	špičatost

$\mu$ ( E)	střední hodnota
$\mu'^2$ ( D)	rozptyl
$\sigma$	směrodatná odchylka
$\mu_x$	střední hodnota souřadnice x
$\mu_y$	střední hodnota souřadnice y
$L_{\text{mean}}$	vzdálenost bodů od ideální pozice
$L_{AB}$	vzdálenost dvou následujících bodů
$\varphi_i$	velikost úhlu mezi dvěma body COP vzhledem k ideální pozici
$\text{diff}_x$	diference souřadnic x
$\text{diff}_y$	diference souřadnic y

# Obsah

<b>1</b>	<b>ÚVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>ANATOMIE, FYZIOLOGIE A PATOFYZIOLOGIE SLUCHOVĚ-ROVNOVÁŽNÉHO APARÁTU .....</b>	<b>2</b>
2.1	ANATOMIE A FYZIOLOGIE SLUCHU.....	2
2.1.1	<i>Sluch.....</i>	2
2.2	ANATOMIE A FYZIOLOGIE ROVNOVÁŽNÉHO ÚSTROJÍ .....	2
<b>3</b>	<b>VYŠETŘOVACÍ METODY ROVNOVÁŽNÉHO SYSTÉMU .....</b>	<b>4</b>
3.1	VYŠETŘENÍ VESTIBULO-OKULÁRNÍCH REFLEXŮ .....	4
	<i>Očité pozorování.....</i>	4
	<i>Elektronystagmografie.....</i>	4
3.2	VYŠETŘENÍ SPONTÁNNÍCH VESTIBULO-SPINÁLNÍCH REFLEXŮ .....	5
	<i>Subjektivní vyšetření .....</i>	5
	<i>Objektivní vyšetření .....</i>	5
3.3	VESTIBULÁRNÍ EVOKOVANÉ POTENCIÁLY (VEMP).....	6
<b>4</b>	<b>POSTUROMETRIE .....</b>	<b>8</b>
4.1	TĚŽIŠTĚ, GRAVITAČNÍ STŘED A CENTRUM TLAKU .....	8
4.2	TECHNOLOGIE.....	8
4.2.1	<i>Piezoelektrické senzory.....</i>	9
4.2.2	<i>Tenzometrické senzory.....</i>	9
4.3	POSTUROMETRIE - 3 KOMPONENTY.....	11
<b>5</b>	<b>PŘÍSTROJ OTOMETRICS BALANCE PLATFORM .....</b>	<b>13</b>
5.1	POSTUROMETRIE - POPIS VYŠETŘENÍ.....	14
<b>6</b>	<b>DATA A JEJICH ANALÝZA.....</b>	<b>16</b>
6.1	POHLED NA DATA .....	17
6.2	TEORIE CHYB .....	17
6.3	ČÍSELNÉ CHARAKTERISTIKY .....	18
6.4	NORMALITA DAT .....	20
6.4.1	<i>Normální rozdělení.....</i>	20
6.4.2	<i>Normované normální rozdělení.....</i>	21
6.4.3	<i>Standardizace .....</i>	22
6.4.4	<i>Ověření normality dat.....</i>	23
<b>7</b>	<b>TESTOVÁNÍ REÁLNÝCH DAT .....</b>	<b>24</b>
7.1	DATA PACIENTŮ .....	24
7.1.1	<i>Zobrazení dat.....</i>	24
7.2	POSTUP TESTOVÁNÍ.....	27
7.3	ANOVA TEST.....	28
7.4	KRUSKAL-WALLIS TEST .....	29
7.5	VÝPOČTY CHARAKTERISTICKÝCH VELIČIN .....	31
7.6	STANOVENÍ HYPOTÉZ.....	32



<b>8</b>	<b>VÝSLEDKY TESTOVÁNÍ.....</b>	<b>33</b>
8.1	SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ TESTOVÁNÍ.....	54
<b>9</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>56</b>
<b>10</b>	<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>58</b>
<b>11</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.</b>

# 1 ÚVOD

Poruchy rovnováhy jsou závažným zdravotním problémem výrazně snižujícím kvalitu života člověka. Při odborném vyšetřování pacienta s podezřením na poruchu funkce rovnovážného ústrojí je důležitá anamnéza a testování komplexu podílejícího se na držení rovnováhy - rovnovážný aparát vnitřního ucha, vizuální centrum, propioceptivní a somatosenzorické vstupy smyslových orgánů.

Pro měření komplexní koordinační schopností pro udržení stability je používána posturometrie (jako jedna z mnoha metod), která detekuje nejen funkční systém pro držení rovnováhy, ale i jeho propojení s neuromuskulárním systémem (propriocepce, vedení a kontrola). Přesné určení deficitu tohoto funkčního řetězce není možné. Interpretace výsledků je zpravidla spojením různých diagnostických oborů a přesné výsledky závisí na zkušenostech a znalostí diagnostiky.

Práce je zaměřena na statistickou analýzu biometrických dat, poskytnutých v rámci spolupráce s Centrem pro poruchy sluchu a rovnováhy. Poskytnutá data představují náhodný výběr pěti zdravých pacientů a pěti pacientů s poruchou rovnovážného ústrojí a byly měřeny přístrojem firmy Otometrics - Balance Platform.

Při posturometrickém vyšetření přístroj v kombinaci se softwarem zaznamenává a vyhodnocuje pohyb těžiště (COP) pacienta, jak moc se kýve (vychyluje z rovnovážné polohy) za kontrolovaných testovacích podmínek. Tyto data pomáhají klinikovi určit, zdali existuje akutní riziko upadnutí pacienta. Software VestLab pro zobrazení a zpracování dat, který je součástí plošiny Otometrics, nenabízí klinikovi všechny potřebné informace pro korektní diagnostiku zdravotního stavu pacienta, proto se pomocí statistické analýzy dat rozšíří základní diagnostické funkce přístroje.

Statistické analýzy dat jsou provedeny s využitím prostředí MATLAB a STATGRAPHICS. Pro zpracování dat mimo prostředí VestLab bylo nutné převést binárně uložená data z formátu \*.vlr do formátu textového souboru, který je vhodný pro další zpracování. Protože firmou Otometrics nebylo dodáno organizační schéma binárního souboru, bylo nutné vyvinout vlastní dekodovací nástroj v prostředí MATLAB.

Z takto získaných dat bude vypočten soubor charakteristických veličin (celková dráha, vzdálenost dvou sousedních bodů COP, vzdálenost od ideální pozice, apod.) a tyto veličiny budou podrobeny statistické analýze pro korektní interpretaci výsledků a objektivnímu nastavení kritérií pro posouzení zdravotního stavu pacienta.

## 2 Anatomie, fyziologie a patofyziologie sluchově-rovnovážného aparátu

### 2.1 Anatomie a fyziologie sluchu

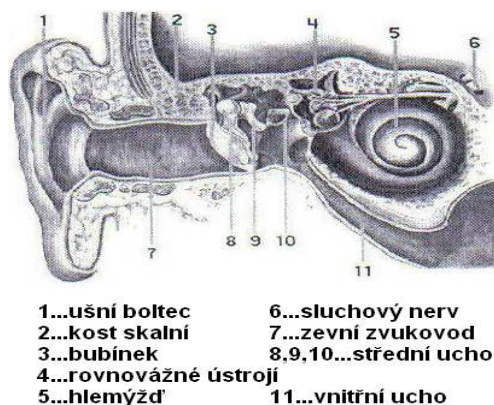
#### 2.1.1 Sluch

Smyslovým orgánem pro vnímání zvuku je ucho. Ucho je tvořeno vnějším zvukovodem, středním uchem a vnitřním uchem. Mechanické vlnění (zvuk) vstupuje do vnějšího zvukovodu, který je ohraničen chrupavkou – ušním boltcem. (Obrázek 1) [1]

*Vnější zvukovod* je 2-3 cm dlouhá trubice ze 2/3 chrupavčitá s jemnou výstelkou a mazovými žlázami a z 1/3 kostěná.

*Střední ucho* obsahuje bubínek (blanka oddělující vnější zvukovod a střední ucho) a tři ušní kůstky – kladívko, kovádlínku a třmínek.

*Vnitřní ucho* se skládá z blanitého a kostěného hlemýžďe a z rovnovážného aparátu.



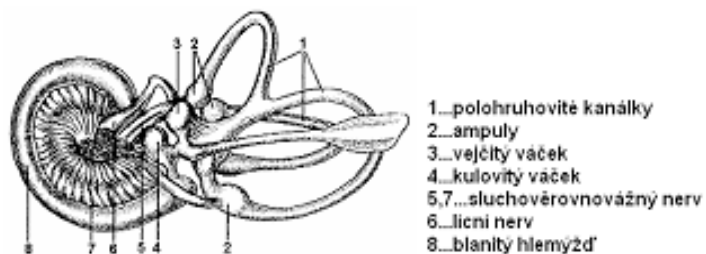
Obrázek 1: Lidské ucho [1]

### 2.2 Anatomie a fyziologie rovnovážného ústrojí

Vestibulární ústrojí je umístěno ve vnitřním uchu. Společně s kostěným hlemýžďem tvoří statoakustický aparát. Skládá se ze tří polokruhovitých kanálků, které jsou vždy na 1 konci rozšířené – tvoří tzv. ampuli, a dále se skládá z vejčitého a kulovitého váčku (Obrázek 2). [1], [2]

Pomocí receptorů v nich uložených udržuje tělo rovnováhu v pohybu i klidu. Další receptory jsou uloženy v kožním, svalovém a zrakovém mozkovém centru. Vzruchy těchto receptorů působí reflektoricky proti gravitaci na vyrovnaní rovnováhy (ruce, hlava, tělo). Reflexy vestibulárního ústrojí působí na zastavení zorného pole na sítnici při pohybu hlavy. Jsou stále

aktivní. Funkce vestibulárního ústrojí se vyvíjí ještě v prenatálním období. Poškození rovnovážného ústrojí způsobuje závratě, nevolnost, točení hlavy či okolního světa.



**Obrázek 2: Blanitý hlemýžď s rovnovážným ústrojím [1]**

Blanitý labyrint se dělí na část vestibulární a kochleární. Vestibulární část blanitého hlemýžďe tvoří dva váčky - kulovitý (utricle) a vejčitý (sacculus), spojené kanálkem (ductus utriculosaccularis). Uvnitř váčků jsou buňky receptorů gravitace - maculae staticae. Tyto statokinetické čidla přijímají podněty a mění je v nervové vzruchy. Rotační pohyby hlavy se zaznamenávají ohybem smyslových buněk uložených v ampulách (rozšířené části polokruhovitých kanálků) a následně se mění na nervový vzruch, který se dál šíří nervovým systémem.

### 3 Vyšetřovací metody rovnovážného systému

Při vyšetřování pacienta s podezřením na poruchu rovnováhy je důležitá anamnéza - soubor otázek osvětlující minulý a současný stav pacienta. [4], [5]

Dotazník můžeme rozdělit do několika tematických částí (dle Claussena<sup>1</sup>). První část otázek je zaměřená na kvalitu a kvantitu závratí, nevolností a co tyto stavy vyvolává. Druhý soubor otázek nám dá odpovědi ohledně případných poruch hlavových nervů - poruchy zraku, sluchu, čichu, chuti atd. Třetí skupina otázek se zaměřuje na další nemoci pacienta, především úrazy hlavy, páteře, nemoci oběhové a srdeční soustavy, poruchy látkové výměny. Předposlední část otázek se týká údajů, jaké léky pacient užívá a zda užívá nějaké drogy. V poslední části nás zajímá pacientovo subjektivní hodnocení průběhu jeho závrativého onemocnění.

Pomocí lékařských vyšetření se následně odhalí, o jakou poruchu se jedná a ve kterých místech rovnovážné dráhy se porucha nachází.

#### 3.1 Vyšetření vestibulo-okulárních reflexů

VOR (vestibulo-okulární reflexy) zajišťují ostré vidění a udržení objektu v zorném poli při pohybu hlavy.

##### Očité pozorování

Pro rozpoznání spontánního nystagmu pacient sedí a sleduje přímo a pohybující prst vyšetřujícího přímo, vlevo, vpravo, nahoru a dolů (hodnotí se nystagmus při fixaci)

K vyloučení fixace se při vyšetřování používají brýle: Frenzlovy (+15Dp) nebo Bartesovy (+20Dp).

##### Elektronystagmografie

Elektronystagmogram vzniká snímáním změny elektropotenciálu při pohybu oka. Oko je považováno za elektrický dipól - kladný pól je rohovka a záporný pól je sítnice. Polygrafický záznam lze vyhodnocovat a při dlouhodobém snímání také srovnávat.

VNG (video elektronystagmografie) je vyšetření rozšířené o video záznam pohybu očí. Dále se při vyšetřování může použít LED lišta, která obsahuje spoustu svítících diod, kde můžeme měnit rychlost a pravolevý směr jejich postupného rozsvěcování. Podle rychlosti reakce očí na měnící se stimul lze přesně určit správnost očních pohybů. Zkoušky pro vyšetřování vestibulookulárních jevů: kalorické, rotační, galvanické, přístělového příznaku, sledovací oční pohyby a optokinetický nystagmus.

---

<sup>1</sup> Claus-Frenz Claussen - viz [http://de.wikipedia.org/wiki/Claus-Frenz\\_Claussen](http://de.wikipedia.org/wiki/Claus-Frenz_Claussen)

### 3.2 Vyšetření spontánních vestibulo-spinálních reflexů

VSR (vestibulo-spinální reflexy) udržují tělo ve vzpřímené poloze a zapojuje příslušné svaly pro udržení rovnováhy při pohybu.

#### Subjektivní vyšetření

Pacient provádí různé cviky v sedu nebo ve stoje a většinou je umístěn do prostoru s vytyčenými hranicemi. Lékař posuzuje polohu těla vůči původní poloze a vůči hranicím (zda překročil mez a o jakou vzdálenost), padání pacienta k určité straně apod.

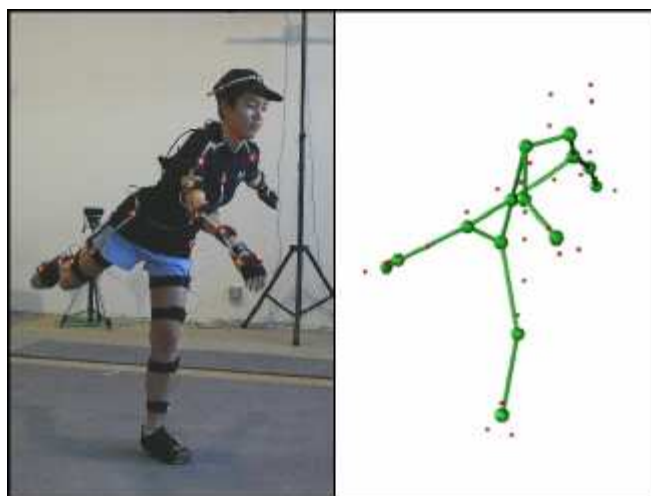
Mezi tato vyšetření se řadí: Hautantova zkouška, Barányho zkouška, Zkouška chůzí, Unterbergerova zkouška, Unterberger-Fukudova zkouška a Rombergova zkouška.

Některá z těchto vyšetření lze provádět na posturometrické plošině (viz Kapitola 5).

#### Objektivní vyšetření

##### *Kraniokorpografie*

Při tomto vyšetření se na tělo pacienta připevní žárovky - pro snímání polohy hlavy a trupu. Světelné stopy při pohybu se zaznamenávají a vyhodnocují. (Obrázek 3)



Obrázek 3: Kraniokorpografie [5]

## ***Posturografie***

Vyšetření se provádí na posturometrické (stabilometrické) plošině, která vyhodnocuje smysl pro rovnováhu.

Modifikovaný klinický test senzorické interakce a rovnováhy (mCTSIB) poskytuje objektivní měření rovnováhy („kývání“), když je pacient umístěn v podmínkách, které simulují běžné denní činnosti. Tento test nemůže poskytnout informace o místě léze (poruchy) nebo vzor smyslové dysfunkce.

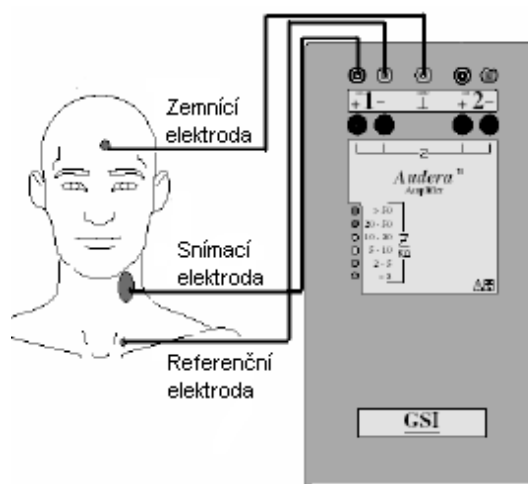
Informace o limitách stability (LOS) poskytuje objektivní měření o posunutí těžiště pacienta pomocí speciálně vyvinutých cvičení na posturometrické plošině.

## **3.3 Vestibulární evokované potenciály (VEMP)**

Vestibulární evokované svalové potenciály (VEMP - Vestibular Evoked Myogenic Potentials) se začaly měřit v 90. letech 20. století. Účelem testu je určit, jestli kulovitý váček, přední vestibulární nerv a vestibulární nervové cesty správně fungují. VEMPy jsou obvykle kompletní stejnostranné odpovědi na intenzivní zvuk. [9]

### Nastavení testu

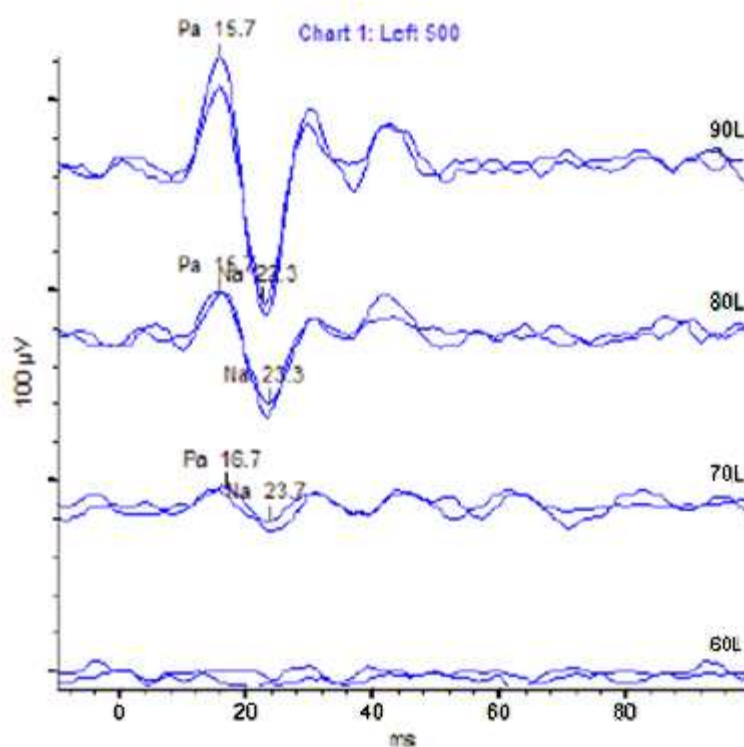
Stimul, který vyvolá odpověď, může být tónový impuls nebo klik nízké frekvence, ale vysoké intenzity (90 – 100 dB nHL). Tónové impulsy pod 1 kHz jsou optimální k vyvolání odpovědi. Montáž elektrod pro VEMP testování obsahuje velkou snímací elektrodu, umístěnou uprostřed musculus sternocleidomastoideus (SCM), referenční elektrodu, umístěnou na sternu nebo kontralaterálně na ruce, a zemní elektrodu, umístěnou uprostřed čela (Obrázek 4). Svaly krku musí být napnuté pro správné snímání odpovědi. Pacient leží na zádech a hlavu má otočenou na druhou stranu než je vyšetřované ucho, tím se SCM napne.



**Obrázek 4: Umístění a zapojení elektrod při VEMP vyšetření [9]**

## Odezvy

VEMP odpovědi zahrnují na začátku pozitivní vlnu, následovanou vlnou negativní (Obrázek 5). Můžeme změřit latenci, amplitudu a práh odpovědi. Normální práh odpovědi je v rozmezí 70 – 90 dB v 15 – 30 ms. Nepřítomnost prahu, nižší práh než je norma a větší zpoždění může indikovat abnormality. Vyšetření VEMP se využívá v diferenciální diagnostice závrativých stavů.



Obrázek 5: Typická VEMP křivka [Nicolet Vestlab]



## 4 Posturometrie

Pro měření komplexní koordinační schopností pro udržení stability je používána posturometrie, která detekuje nejen funkční systém pro držení rovnováhy, ale i jeho propojení s neuromuskulárním systémem (propriocepce, vedení a kontrola). Přesné určení deficitu tohoto funkčního řetězce není možné. Interpretace výsledků je zpravidla spojením různých diagnostických oborů a přesné výsledky závisí na zkušenostech a znalostí diagnostika. [5] [10-13]

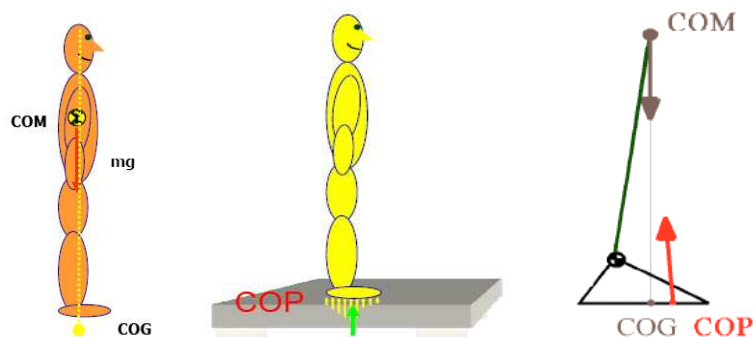
### 4.1 Těžiště, gravitační střed a centrum tlaku

Udržení rovnováhy může být dosaženo různými strategiemi závislými:

- na podmínkách prostředí - adaptace
- na osobních hranicích - kompenzace

Posturometrická plošina je zařízení, které analyzuje pohyb průmětu těžiště těla (COM - center of mass) do roviny plošiny. Tento bod označuje jako COG (center of gravity). Reakce podložky na tuto sílu v odpovídající velikosti je střed tlaku: COP (center of pressure). (Obrázek 6)

Analýzou pohybu bodů COP a COG, můžeme získat mnoho informací svědčících o úrovni globálního fungování a zapojení regulačních obvodů do procesu udržování rovnováhy v ortostatické (vzpřímené) pozici.



Obrázek 6: COM, COG, COP [12]

### 4.2 Technologie

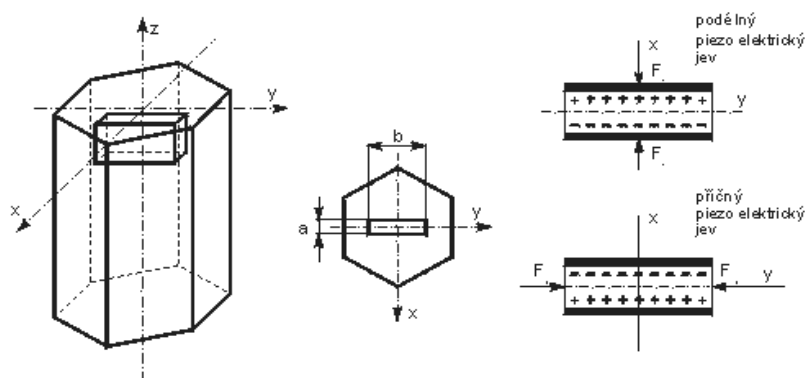
Základem stabilometrické plošiny je pevná báze, na které jsou upevněny senzory a vrchní „nášlapná“ plocha - nejčastěji obdélníkového tvaru.

Plošiny bývají dle použitých senzorů dvojího typu: piezoelektrické a tenzometrické.

### 4.2.1 Piezoelektrické senzory

Piezoelektrické senzory jsou založeny na piezoelektrickém jevu, jehož podstatou je změna distribuce elektrických nábojů v krystalu dielektrika (vznik dipólu). Při mechanickém namáhání podél některé z os dielektrika, dochází k polarizaci v rovinách kolmých na směr působící síly, jejíž hodnota je číselně rovna fiktivnímu vázanému náboji (řadově pC) a vhodným přiložením elektrod na stěny krystalu je možné tento náboj měřit (Obrázek 7). Nejčastěji používaným materiálem pro výrobu piezosenzoru je krystalický křemík pro své výborné vlastnosti: vysoká odolnost proti mechanickému namáhání, odolnost vůči teplotám do 500 °C, vysoká tuhost, takřka lineární odezva, zanedbatelná hystereze a teplotní stabilita.

Piezosenzory jsou "aktivní" systémy, což znamená, že jsou schopny produkovat elektrický signál pouze tehdy, když dojde ke změně mechanické energie. Z tohoto důvodu jsou ideálnější pro měření dynamických změn, jako je analýza chůze. Při použití těchto senzorů v konstrukci posturometrické plošiny se zaznamenávají změny v jejím zatížení. Analýzou změn zatížení je určen posun COP, což je výsledný posturometrický údaj, který je dále analyzován diagnostikem.



Obrázek 7: Piezoelektrický jev u krystalu křemene [13]

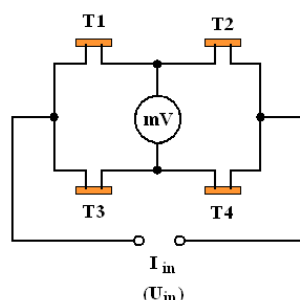
Piezoelementy se zapojují v páru pro zvýšení jejich osové citlivosti. Při zapojení tří párů elementů ve všech třech osách krystalu získáme 3-komponentní senzory (snímání osové síly a dvou momentů). Transdukce šesti složek zatížení je získána ve struktuře, která obsahuje nejméně tři 3-komponentní snímače.

### 4.2.2 Tenzometrické senzory

Tenzometrické senzory, narození od piezoelektrických, jsou založeny na změnách elektrického odporu v závislosti na síle způsobující jejich deformaci. Typicky jsou konstruované z kovových materiálů (konstantan pro svou malou závislost elektrického odporu na teplotě), nebo z příměsových polovodičů na bázi křemíku či germania. Samotný tenzometrický senzor je nalepen na deformační část senzoru, která je následně vystavena mechanickému namáhání. Procentuální změna v délce tenzometru, způsobená určitým zatížením (tahem, tlakem), navozuje

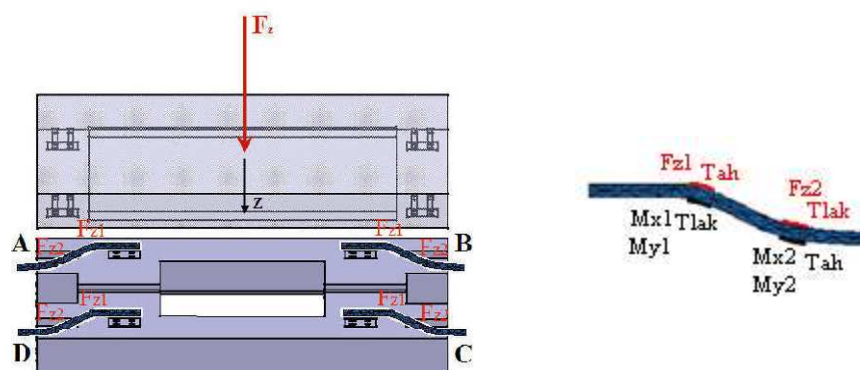
procentuální změnu odporu, která je úměrná deformaci. Pro měření malých změn odporu se používají tenzometry v konfiguraci můstku, s napěťovým nebo proudovým buzením.

Nejpoužívanější zapojení tenzometrů je do Wheatstoneova můstku, protože při statických měřeních kompenzuje vliv teploty. Měření elektrického odporu jednoho tenzometru můžeme použít jen tam, kde nepotřebujeme kompenzovat vliv teploty. Při použití můstku se zvyšuje citlivost na čtyřnásobek ve srovnání s použitím jednoho tenzometru. (Obrázek 8)



**Obrázek 8: Wheatstoneův můstek s tenzometry [14]**

Pro účely měření na posturometrické plošině se využívá základní vlastnosti odporového tenzometru: reakcí na mechanickou deformaci vzniklou působící silou je změna elektrického odporu. Této schopnosti se využívá v siloměrném členu, tvořeném nosníkem, na němž jsou nalepeny tenzometry (Obrázek 9).



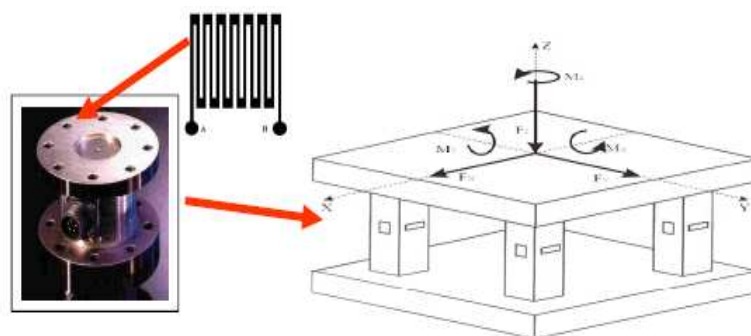
**Obrázek 9: Siloměrný člen v posturometrické plošině [12]**

Tenzometry umístěné proti sobě se chovají jako antagonisté - jeden se natahuje, druhý smršťuje. Zapojením těchto tenzometrů do různých větví můstků dochází ke zvýšení senzitivity měření a ke kompenzaci teplotní závislosti rezistorů.

Stejně jako u piezoelektrických snímačů můžeme úhlovým pootočením v umístění tenzometru na silovém článku docílit prostorového měření. Tenzometrické snímače mají velmi dobré dynamické vlastnosti a jsou přesné, působí na ně však spousta parazitních vlivů, jako již zmíněná teplota a také velikost procházejícího proudu.

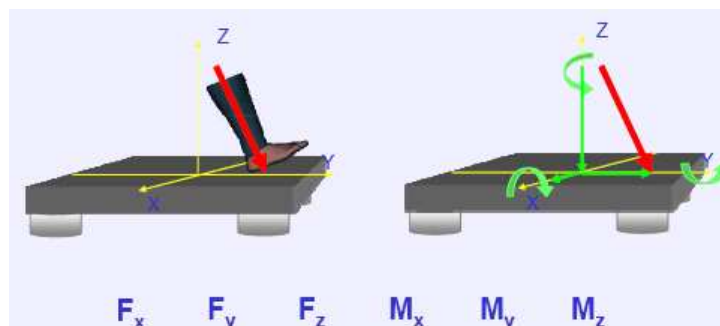
### 4.3 Posturometrie - 3 komponenty

Nejrozšířenější studie držení těla je pomocí platformy s 3-komponentním dynamometrem (Obrázek 10), který zpracovává signály způsobené působením vertikální síly  $F_z$  a dvou momentů kolem osy anterioposterální (předozadní) a mediolaterální (levoprává) ( $M_x$  a  $M_y$ ).



Obrázek 10: 3-komponentní dynamometr a plošina [12]

V analýze držení těla je ve skutečnosti 6 komponentů, ale další tři ( $F_x$ ,  $F_y$  a  $M_z$ ) jsou menšího významu. (Obrázek 11)



Obrázek 11: Síly a momenty [12]

Odpovědi podložky jsou obvykle analyzovány prostřednictvím odvozených veličin, ale mohou být také studovány přímo ze sil a momentů působících na plošinu. K určení souřadnic bodu COP slouží jednoduchá rovnice:

$$x_{COP} = -\frac{M_y}{F_z}; \quad y_{COP} = \frac{M_x}{F_z} \quad (4.1)$$

Z měření sil a momentů pomocí platformy lze takto detekovat pohyb COP jako změnu tlaku na plošinu a získat tím změnu rovnováhy těla na zemi (platformě). Z chování COP lze předvídat pohyb těžiště, při houpavém pohybu na podložce. Jedná se o nepřímé měření toho, jakým způsobem je motorické centrum schopno organizovat jednotlivé segmenty těla důležité k udržení rovnováhy.

Některé 3komponentní platformy mají další aplikace oproti klasickým plošinám popsaných výše. Je možné prokázat, že tlak vyvíjený aktivním čerpáním krve během srdečního cyklu má významný vliv na hmotnost těla ve vzpřímené poloze. Zejména pozitivní vrchol QRS komplexu (maximum R-vlny) funguje jako aktivátor v projevu vertikální síly v řádu 1N. Z toho vyplývá, že masu uvnitř těla vytvářejí vnitřní reakční síly, které jsou mocným mechanismem, který může přispět k vyvolání kývání těla. [5]

## 5 Přístroj Otometrics Balance Platform

Data byly měřeny přístrojem firmy Otometrics - Balance Platform. [10] [11]

Přístroj v kombinaci se softwarem zaznamenává a vyhodnocuje pohyb těžiště (COP) pacienta, a jak moc se kýve (vychyluje z rovnovážné polohy) za kontrolovaných testovacích podmínek. Tyto data pomáhají klinikovi určit, zdali existuje akutní riziko upadnutí pacienta. Navíc může být systém použit ke zlepšení pacientova smyslu pro rovnováhu pravidelným trénováním, které jim umožní sledovat jejich pokrok od návštěvy k návštěvě střediska.

Testovací zařízení má dvě hlavní části - platformu (stabilometrickou plošinu) a počítač, které jsou vzájemně spojeny pomocí kabelu USB. Plošina snímá kolmou sílu z noh pacienta a tyto údaje posílá do počítače. Počítač přijímá a analyzuje data, zobrazuje a ukládá data na pevný disk v počítači. Přístroj je dodáván společně s pěnovým polštářem důležitým pro některá vyšetření.

Platforma by měla být umístěna přímo před monitorem, aby měl pacient přímý výhled na obrazovku (nejlépe plochý monitor pověšený na zdi ve výšce očí). Lékař sleduje průběh testu, přístroj by neměl být používán bez odborného dohledu.

Přístroj Otometrics Balance Platform nabízí širokou škálu testů:

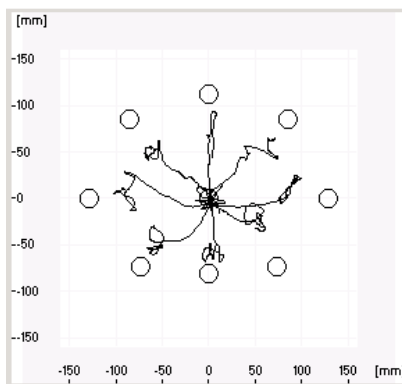
### Balance Screening

Modifikovaný klinický test senzorické interakce a rovnováhy (mCTSIB) poskytuje objektivní měření houpání, kdy je pacient postaven do 4 situací, které byly vyvinuty na základě běžných denních činností. Tento test nemůže poskytnout informace o místě léze (poruchy) nebo smyslové dysfunkce.

- Stoj s otevřenýma očima na pevném povrchu, poté na pěnovém polštáři a stejné vyšetření se zavřenýma očima (Rombergova zkouška)

Test limit stability (LOS) poskytuje objektivní měření posunutí těžiště pacienta.

- Terč – přiblížení se vrcholu růžice (Obrázek 12)

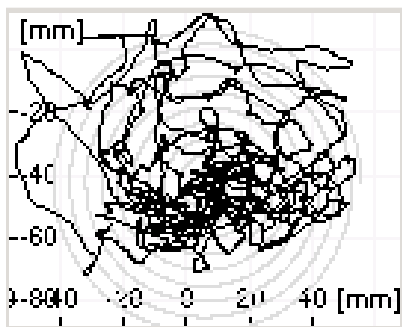


**Obrázek 12: Ukázka testu „Terč“ [Balance Platform-Otometrics]**

### Balance training

Balanční verze poskytuje interaktivní cvičení s real-time monitorování pohybu pacienta a vede k lepší kontrole rovnováhy.

- Pronásledování pohybujícího se bodu do spirály (Obrázek 13)
- Stoj na jedné noze
- Pronásledování pohybujícího se bodu



**Obrázek 13: Ukázka testu „Spirála“ [Balance Platform-Otometrics]**

### Posturometrie

Tento test může být použit pro screening, jako pomocník v diagnostice poruchy i pro trénink rovnováhy. Posturometrie zahrnuje 6 třicetisekundových měření - stoj s otevřenými očima na pevné podložce. Více o tomto vyšetření v následující kapitole 5.1

## **5.1 Posturometrie - popis vyšetření**

Před vyšetřením na plošině je třeba se ujistit, že pacient může stát vzpřímeně, bez opory a bez rizika pádu na pevné podložce s otevřenými očima. Neměl by pít žádný alkohol ani kofein během posledních 2 dnů a neužívat léky ovlivňující rovnováhu pacienta.

Vyšetření je bezbolestné a neinvazivní.

Pacient stojí vzpřímeně, ale uvolněně bez obuvi.

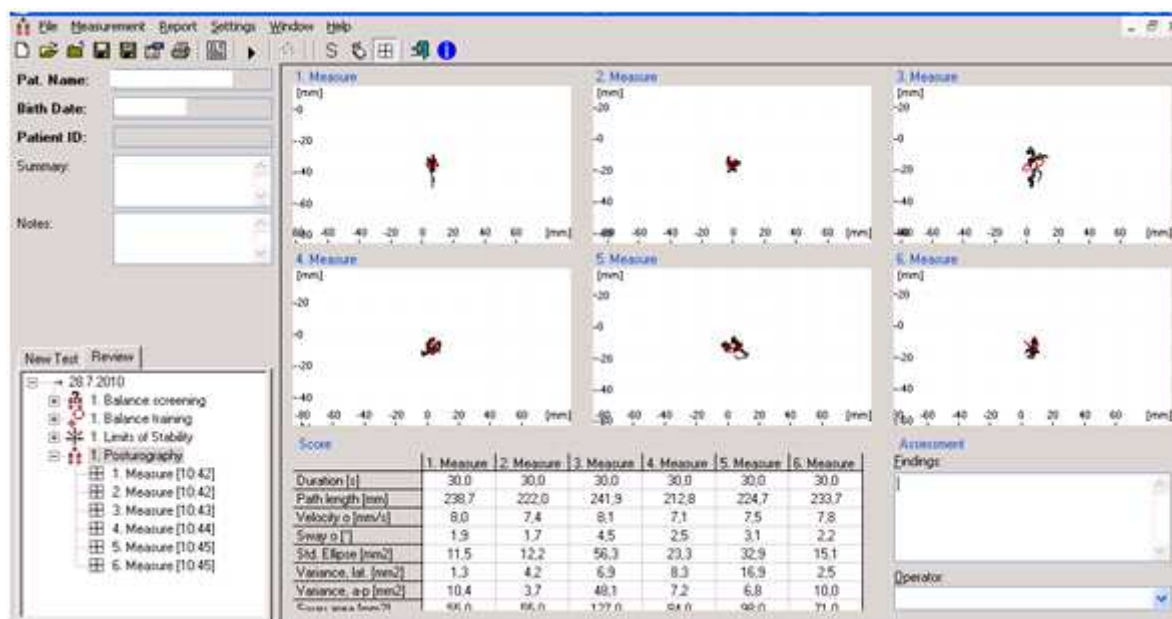
Nohy stojí na plošině ve vyznačených obrysech plosek nohou.

Pacient následuje pokynů vyšetřujícího.

Při spuštění programu je potřeba zadat identifikační údaje pacienta (jméno, datum narození, výška a váha). Po uložení informací se zvolí druh testu - v našem případě Posturografie.

Jak už bylo řečeno v úvodu kapitoly, posturometrické vyšetření trvá 30s a opakuje se 6x. (Obrázek 14) Měření nezačíná bezprostředně po výstupu pacienta na plošinu, ale pacientovi se nechává pár vteřin na zklidnění a nalezení rovnovážné polohy.

Pacient je vyzván, aby si stoupl na plošinu na vyznačená místa, stál vzpřímeně. Oči má otevřené a dívá se před sebe. Je důležité, aby stál na celých ploskách nohou a nestoupal si jen na špičky či paty. Žádný pacient nemusí mít strach z pádu, po celou dobu vyšetření je u něj osoba, která kontroluje správný postup měření, jistí pacienta a v případě nutnosti jej zachytí.



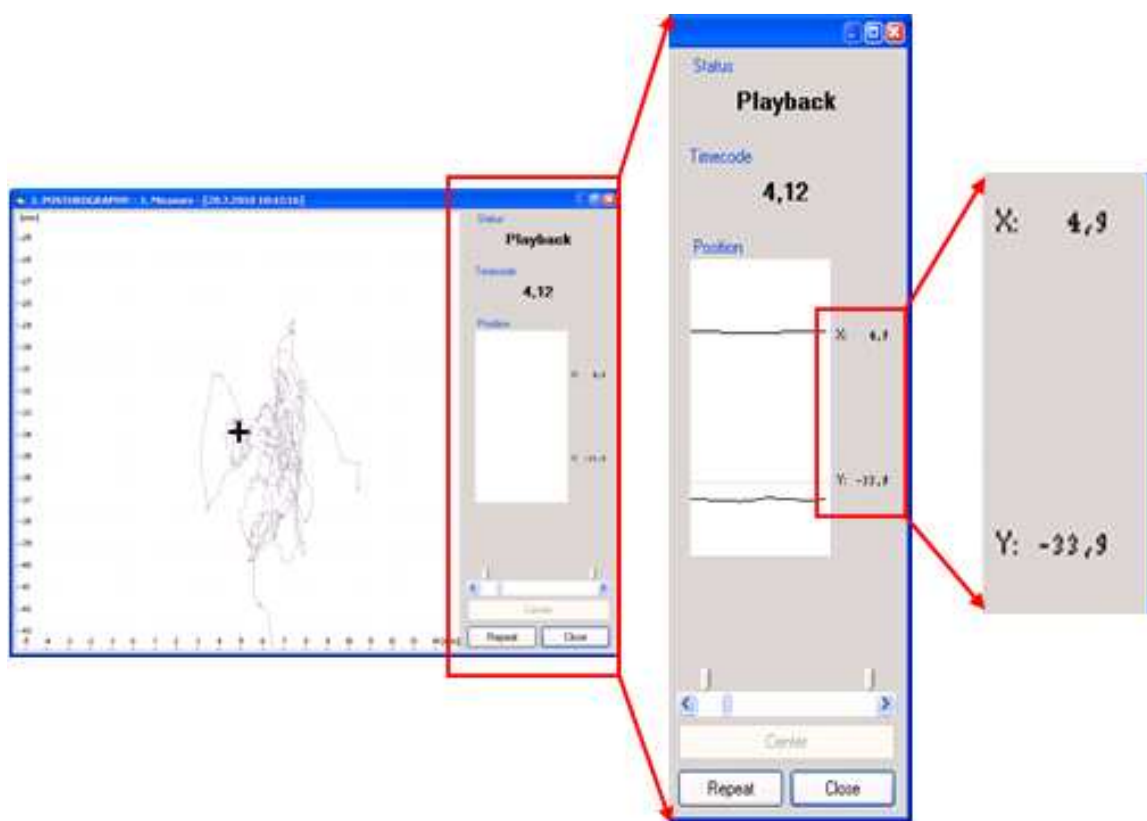
**Obrázek 14: Ukázka posturometrického vyšetření [Balance Platform-Otometrics]**



## 6 Data a jejich analýza

Tato část práce je zaměřena na statistickou analýzu biometrických dat, poskytnutých v rámci spolupráce s Centrem pro poruchy sluchu a rovnováhy<sup>2</sup>. Poskytnutá data představovala náhodný výběr pěti zdravých pacientů a pěti pacientů s poruchou rovnovážného ústrojí.

Následující statistické analýzy dat byly provedeny s využitím prostředí MATLAB<sup>3</sup> a STATGRAPHICS<sup>4</sup>. Pro zpracování dat mimo prostředí VestLab<sup>5</sup> bylo nutné převést binárně uložená data z formátu \*.vlr do formátu textového souboru, který je vhodný pro další zpracování. Protože firmou Otometrics nebylo dodáno organizační schéma binárního souboru, bylo nutné vyvinout vlastní dekódovací nástroj<sup>6</sup> v prostředí MATLAB. Program byl navržen tak, aby zpracovával videosoubor pořízený při prohlížení záznamu měřených dat v programu VestLab. Jedná se tedy o program, který rozpoznává text v dané oblasti videosouboru (Obrázek 15).



Obrázek 15: Ukázka měření a umístění odečítaných dat

<sup>2</sup> Centrum pro poruchy sluchu a rovnováhy, sídlem: Poliklinika APROMED, Ostrava-Poruba

<sup>3</sup> MATLAB 2008a, multilicence VŠB-TUO

<sup>4</sup> STATGRAPHICS Plus 5.0, multilicence VŠB-TUO

<sup>5</sup> ICS BalancePlatform-Vestlab, Otometrics

<sup>6</sup> Program je k nahlédnutí na přiloženém CD („program\_data\video.m“).

Z takto získaných dat byl vypočten soubor charakteristických veličin (celková dráha, vzdálenost dvou sousedních bodů COP, vzdálenost od ideální pozice, apod., viz Kapitola 7.5) a tyto veličiny byly podrobeny statistické analýze pro korektní interpretaci výsledků a objektivním nastavení kritérií pro posouzení zdravotního stavu pacienta. [7], [8], [15]

## 6.1 Pohled na data

Prvotním úkolem je náhled na data z různých hledisek a tím získat informace o souboru dat. Mezi pohledy na data se řadí:

- Explorační analýza dat (průzkumová) - prvotní zhodnocení vlastností souboru, formulování hypotéz, grafické výstupy (krabicové grafy), výpočty číselných charakteristik (viz Kapitola 6.3)
- Konfirmační analýza dat (potvrzovací) - ověřování hypotéz prostřednictvím dat, využívání statistických metod (testy, ANOVA, regrese,...)
- Data mining (těžení z dat) - získávání skrytých a potenciálně užitečných závislostí a informací z dat, využití ve výzkumu a komerční sféře (umělá inteligence, učení,...)

## 6.2 Teorie chyb

Kvalita každého měření je dána velikostí chyby vzniklé v měřicím řetězci. Chyba měření je definovaná jako rozdíl mezi skutečnou a naměřenou hodnotou výstupní.

Chyby měření lze klasifikovat do 4 hlavních tříd dle vzniku chyby:

- Chyby měřicího přístroje - způsobené konstrukcí přístroje (zpravidla je udávají výrobci)
- Chyby metodické - plynou z organizace měření a zvolené metodice
- Chyby teoretické - závisí na užitých principech měřicích metod
- Chyby zpracování dat - jsou způsobeny chybami v použitých matematických metodách pro zpracování dat

Podle příčiny vzniku můžeme dělit chyby:

- Chyby systematické - ovlivňují výsledek konstantní hodnotou, jsou časově závislé nebo záleží na volbě částí měřicího řetězce, tím lze chyby také ovlivnit.
- Chyby nahodilé - nedají se předvídat, mají pravděpodobnostní charakter a jsou popsány statistickými charakteristikami. Jejich příčiny nelze odstranit, jen omezit.
- Chyby hrubé - reprezentují odlehlé hodnoty měření od ostatních, které mohou způsobit velké chyby výsledku statistického vyhodnocování.

### 6.3 Číselné charakteristiky

Soubor dat lze popsat několika základními parametry, které charakterizují vybrané vlastnosti souboru a umožňují srovnání mezi daty:

- Obecný moment -  $\mu_r$  nebo  $E(X^r)$ ,  $r = 1, 2 \dots$

$$\mu_r = \sum_i x_i^r \cdot P(x_i) \quad (6.1)$$

- Střední hodnota = obecný moment 1. řádu -  $\mu$  nebo  $E(X)$

$$\mu = \sum_i x_i \cdot P(x_i) \quad (6.2)$$

- často se střední hodnota označuje také jako průměr

- Centrální moment -  $\mu'_r = E(X - E(X))^r$ ,  $r = 1, 2 \dots$

$$\mu'_r = \sum_i (x_i - E(X))^r \cdot P(x_i) \quad (6.3)$$

- Rozptyl = druhý centrální moment -  $\mu'_2$  nebo  $D(X)$

$$\mu'_2 = \sum_i (x_i - E(X))^2 \cdot P(x_i) \quad (6.4)$$

- v praxi se používá pro výpočet rozptylu vztah:  $D(X) = E(X^2) - (E(X))^2$
- parametr určující rozptýlenost (variabilitu) náhodné veličiny kolem její střední hodnoty
- jednotka rozptylu je kvadrátem jednotky náhodné veličiny

- Směrodatná odchylka -  $\sigma$

$$\sigma = \sqrt{D(X)} \quad (6.5)$$

- stejně jako rozptyl je směrodatná odchylka parametrem určujícím variabilitu náhodné veličiny
- jednotkou odchylky je jednotka náhodné veličiny

---

<sup>7</sup> Pozn.:  $x_i \dots$  náhodná veličina,  $P(x_i) \dots$  pravděpodobnostní funkce náhodné veličiny [7]

- Šikmost -  $\alpha_3$

$$\alpha_3 = \frac{\mu_3}{\sigma^3}$$

(6.6)

- ze vztahu (6.6) vidíme, že šikmost je podílem 3. centrálního momentu a třetí mocniny směrodatné odchylky a je mírou symetrie rozdělení pravděpodobnosti náhodné veličiny.

- vzhledem k normálnímu rozložení náhodné veličiny určujeme symetrické rozdělení ( $\alpha_3=0$ ), negativně zešikmené rozdělení ( $\alpha_3>0$ ) a pozitivně zešikmené rozdělení ( $\alpha_3<0$ ).

- Špičatost -  $\alpha_4$

$$\alpha_4 = \frac{\mu_4}{\sigma^4}$$

(6.7)

- podílem 4. centrálního momentu a čtvrté mocniny směrodatné odchylky vyjádříme špičatost. Tento parametr nám charakterizuje koncentraci hodnot náhodné veličiny kolem její střední hodnoty

- vzhledem k normálnímu rozložení náhodné veličiny rozlišujeme *normální špičatost* ( $\alpha_4=3$ ), menší špičatost než u normálního rozdělení - *plošší rozdělení* ( $\alpha_4<3$ ) a větší špičatost než u normálního rozdělení - *špičatější rozdělení* ( $\alpha_4>3$ ).

- Kvantily -  $x_p$

- stanovení kvantilů není příliš jednoznačné, proto se v praxi téměř nepoužívá

$$\forall p \in \langle 0; 1 \rangle: F(x_p) = p$$

(6.8)

- hodnota kvantilu udává, kolik procent dat ze statistického souboru ( $100p\%$ ) má menší hodnotu než  $x_p$ .

- Medián =  $x_{0,5}$

- prostřední hodnota seřazeného souboru dat (od nejmenší po největší). V případě sudého počtu hodnot je medián roven aritmetickému průměru dvou prostředních hodnot.

- Kvartily

- dolní kvartil ( $x_{0,25}$ ) a horní kvartil ( $x_{0,75}$ ) dělí soubor dat na pomyslné čtvrtiny

( $x_{0,75} - x_{0,25}$ ) ... mezikvartilové rozpětí

- Decil -  $x_{k/10}$ ,  $k = 1, 2 \dots$

- k-tý decil - dělí statistický soubor na desetiny

- podobně jako u kvartilu můžeme definovat mezidecilové rozpětí

- Percentil -  $x_{k/100}$ ,  $k = 1, 2 \dots$ 
  - k-tý percentil - dělí statistický soubor na setiny
  - podobně jako u kvartilu a decilu můžeme definovat mezipercentilové rozpětí
- Modus -  $\hat{x}$ 
  - hodnota, která se v daném statistickém souboru vyskytuje nejčastěji (je to hodnota znaku s největší relativní četností). Soubor může mít více modusů.

## 6.4 Normalita dat

Vhodný výběr statistické metody je velmi důležitý. Vyvarujeme se tím chybám a analýzám, které nám nedají požadované informace o datech.

Prvním krokem statistické analýzy by mělo být ověření normality\_souboru dat. Předpoklad, že data pocházejí z procesu s normálním rozložením.

### 6.4.1 Normální rozdělení

- Obecný zápis:

$$X \rightarrow N(\mu; \sigma^2), \quad (6.9)$$

- Hustota pravděpodobnosti: (Obrázek 16)

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\left(\frac{x-\mu}{\sqrt{2}\sigma}\right)^2}, -\infty < x < \infty \quad (6.10)$$

- Distribuční funkce: (Obrázek 16)

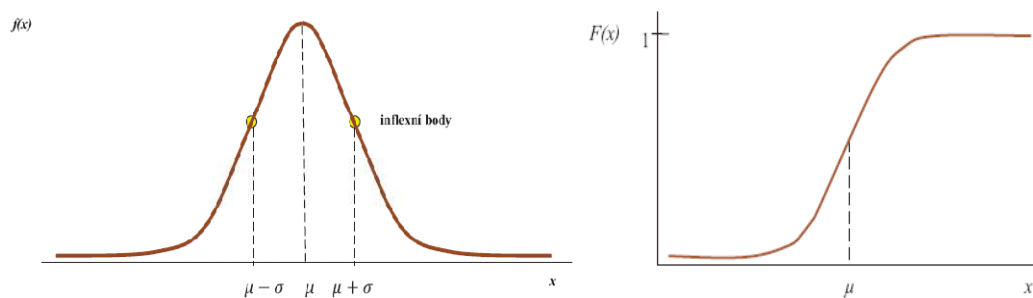
$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^x e^{-\left(\frac{t-\mu}{\sqrt{2}\sigma}\right)^2} dt \quad (6.11)$$

- Střední hodnota:

$$EX = \mu \quad (6.12)$$

- Rozptyl:

$$DX = \sigma^2 \quad (6.13)$$



**Obrázek 16: Graf hustoty pravděpodobnosti normálního rozdělení - Gaussova křivka (vlevo); Graf distribuční funkce normálního rozdělení (vpravo) [8]**

### 6.4.2 Normované normální rozdělení

Pro jednodušší a již tabelované hodnoty (viz Příloha I) se v praxi využívá vyjádření distribuční funkce náhodné veličiny s normálním rozložením pomocí distribuční funkce normované náhodné veličiny, tzn. normální náhodné veličiny, kde  $\mu = 0$ ,  $\sigma = 1$ .

- Obecný zápis:

$$Z \rightarrow N(0; 1)$$

(6.14)

- Hustota pravděpodobnosti: (Obrázek 17)

$$\varphi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{z^2}{2}}; \quad -\infty < z < \infty \quad \varphi(z) = \varphi(-z)$$

(6.15)

- Distribuční funkce:

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^z e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$

(6.16)

- Střední hodnota:

$$EZ = 0$$

(6.17)

- Rozptyl:

$$DZ = 1$$

(6.18)

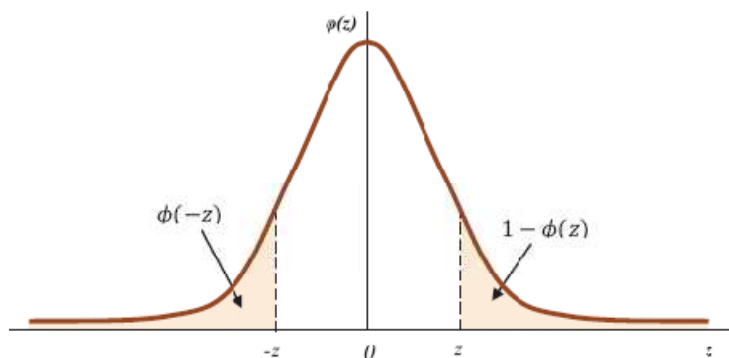
Díky tabelované distribuční funkci normovaného normálního rozdělení lze spočítat distribuční funkci normálního rozložení s jakýmkoliv parametry  $\mu$  a  $\sigma$ .

V tabulce (Příloha II) nalezneme hodnoty distribuční funkce pouze pro  $z \geq 0$ , proto se využívá vlastnosti:

$$\phi(-z) = 1 - \phi(z); -\infty < z < \infty \quad (6.19)$$

Kvantily normovaného normálního rozdělení budeme označovat  $z_p$  a platí pro ně vztah:

$$z_p = -z_{1-p} \quad (6.20)$$



**Obrázek 17: Graf hustoty pravděpodobnosti normované náhodné veličiny normálního rozložení. [8]**

### 6.4.3 Standardizace

Proces transformace dat s normálním rozdělením na data normovaná (standardní) se nazývá standardizace.

Náhodná veličina normálního rozdělení je definovaná:

$$X \rightarrow N(\mu; \sigma^2) \quad (6.21)$$

Náhodná veličina normovaného normálního rozdělení je definovaná:

$$Z \rightarrow \frac{X - \mu}{\sigma}; Z \rightarrow N(0; 1) \quad (6.22)$$

Ze vzorců (6.21) a (6.22) plyne vztah mezi distribučními funkcemi:

$$F(X) = \Phi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right) \quad (6.23)$$

#### **6.4.4 Ověření normality dat**

Grafické znázornění pro ověření normality vizuálním posouzením (Q-Q graf, Odhad hustoty, Kruhový graf) se často kombinuje s testy normality (Shapiro-Wilk parametrický test apod.). V diplomové práci se využívá nástrojů programu STATGRAPHICS Plus Application Software jako součást samotného testování hypotéz (viz výsledky testování Kapitola 8).



## 7 Testování reálných dat

K testování máme k dispozici soubor celkem 10 pacientů - 5 zdravých pacientů a 5 pacientů s poruchou rovnováhy.

Výpočty a kódy jsou k nalezení na přiloženém CD<sup>8</sup>.

### 7.1 Data pacientů

Data pacientů zahrnují časovou osu a souřadnice COP [x,y] na plošině. X a y souřadnice jsou ukládány prostřednictvím Matlabu do souboru data\_pacienti.mat (resp. data\_pacienti.xls - zeleně označený pacient je zdravý, červeně nemocný).

Označení veličin:

t ... časová osa (0.02:0.02:30s)

d ... délka vyšetření (30s)

xZ ... matice 1500x30 x- souřadnic všech zdravých pacientů, každý pacient má 6 měření uložených po sobě následujících sloupcích (tzn. 1500x6 je jeden pacient)

yZ ... matice 1500x30 y- souřadnic všech zdravých pacientů, každý pacient má 6 měření uložených po sobě následujících sloupcích (tzn. 1500x6 je jeden pacient)

xN ... matice 1500x30 x- souřadnic všech nemocných pacientů, každý pacient má 6 měření uložených po sobě následujících sloupcích (tzn. 1500x6 je jeden pacient)

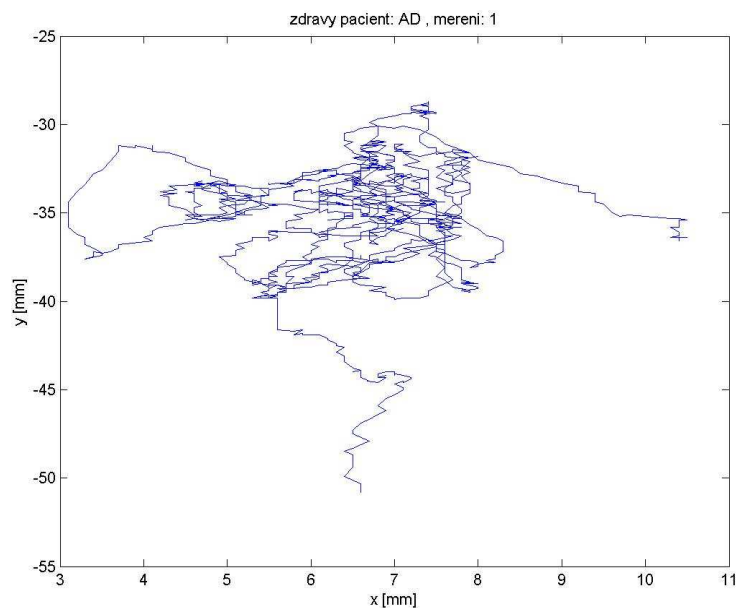
yN ... matice 1500x30 y- souřadnic všech nemocných pacientů, každý pacient má 6 měření uložených po sobě následujících sloupcích (tzn. 1500x6 je jeden pacient)

#### 7.1.1 Zobrazení dat

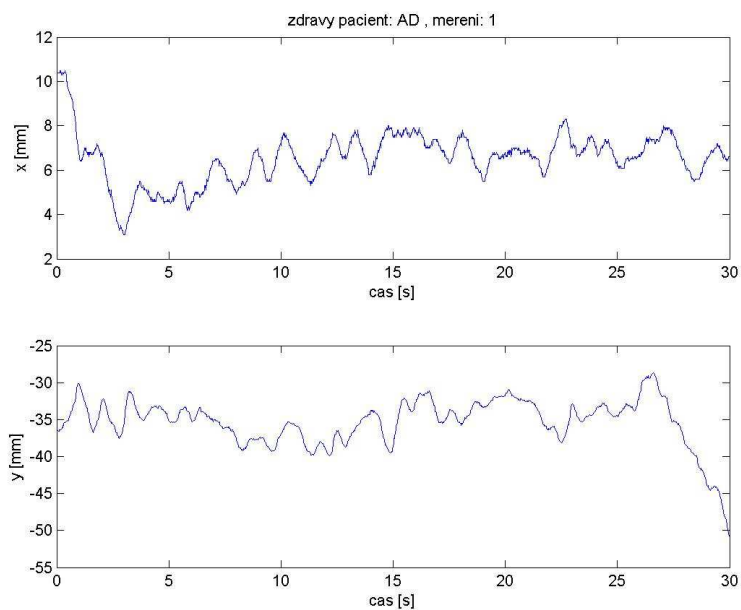
Na obrázku 18 je zobrazeno jedno posturometrické měření zdravého pacienta v rovině X, Y. Následují obrázky zobrazující souřadnice x a y v průběhu celého 1 měření (Obrázek 19). Měření obsahuje 1500 hodnot - každou 0.02s je zaznamenána poloha pacienta ve 30s vyšetření.

---

<sup>8</sup> statistické výpočty, výpočty veličin a zobrazení načtených dat - „zpracovani\_dat\_matlab\DPstatistika.exe (resp. DPstatistika.m)“

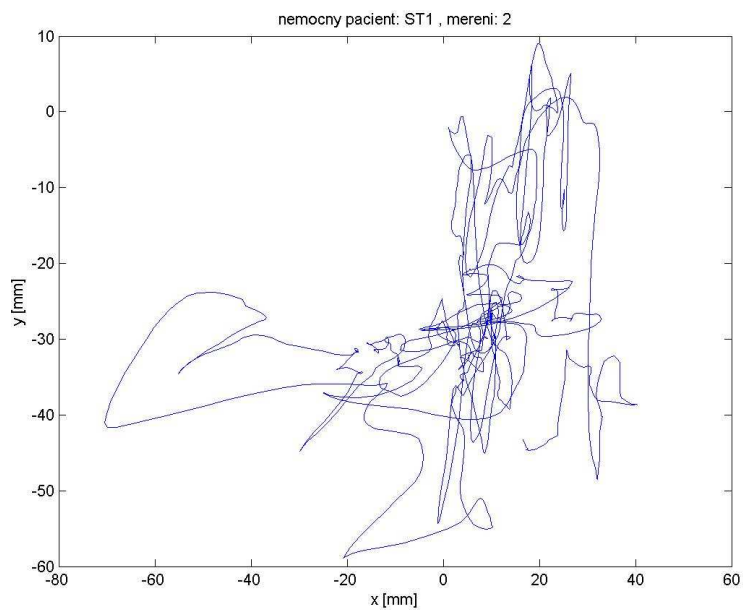


**Obrázek 18: Posturometrické vyšetření zdravého pacienta [MATLAB]**

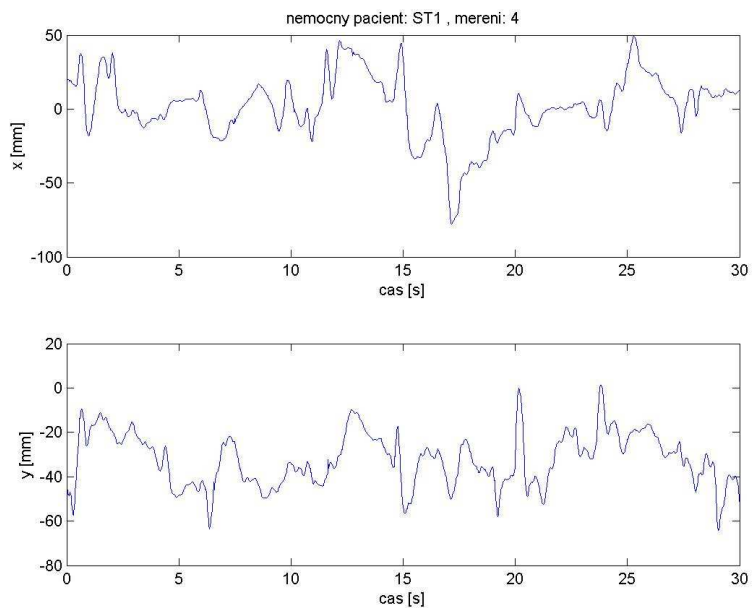


**Obrázek 19: Průběh x a y souřadnic posturometrického vyšetření zdravého pacienta [MATLAB]**

Pro srovnání je na následujících obrázcích uvedeno vyšetření a průběhy hodnot nemocného pacienta (Obrázek 20, Obrázek 21).



**Obrázek 20: Posturometrické vyšetření nemocného pacienta [MATLAB]**



**Obrázek 21: Průběh x a y souřadnic posturometrického vyšetření nemocného pacienta [MATLAB]**

Všechny grafy pacientů jsou uloženy na přiloženém CD<sup>9</sup>.

<sup>9</sup> obrázky - „zpracovani\_dat\_matlab\obrazky\zdravi“ resp. „...\\obrazky\ nemocni“

## 7.2 Postup testování

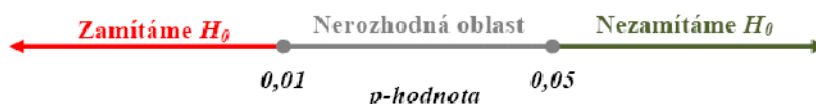
Vhodný výběr statistické metody je velmi důležitý. Vyvarujeme se tím chybám a analýzám, které nám nedají požadované informace o datech. [8]

Prvním krokem statistické analýzy by mělo být ověření normality souboru dat. Předpoklad, že data pocházejí z procesu s normálním rozložením.

Po ověření normality se přechází k samotnému testování hypotéz. V případě zamítnutí nulové hypotézy se pomocí tzv. Post hoc analýzy zjišťuje, proč k zamítnutí došlo (kvůli kterým souborům dat se hypotéza zamítla).

- Vyslovíme nulovou a alternativní hypotézu
  - statistická hypotéza je výrok (tvrzení) o vlastnosti náhodné veličiny, jejíž platnost předpokládáme. Pomocí testu hypotézy ji můžeme zamítnout nebo přijmout.
    - Nulová hypotéza -  $H_0$  (testuje se)
    - Alternativní hypotéza -  $H_A$
- Vybereme vhodný test
  - parametrický test - testy parametrů dat ( $\mu, \sigma, \dots$ ) - ANOVA test
  - neparametrický test - testy typu rozdělení dat, nezávislosti výběru a jiných vlastností - KRUSKAL-WALLIS test
- Zvolíme hladinu významnosti  $\alpha$ 
  - obvykle je  $\alpha=0,05$
  - v lékařství  $\alpha=0,01$
- Určíme kritický obor, hodnotu testovacího kritéria, pozorovnou hodnotu a p-hodnotu
  - kritický obor  $W$  je množina hodnot, pro které se  $H_0$  zamítá (na druhé straně je obor přijetí  $V$ ). Hraniční hodnota mezi těmito dvěma intervaly je kritická hodnota  $t_{krit}$
  - testovací kritérium  $T(X)$  má vztah k nulové hypotéze a při její platnosti známe  $T(X)$  rozložení. Pokud  $T(X)$  padne do kritického oboru, zamítáme  $H_0$ .
  - výpočet pozorované hodnoty  $x_{obs}$  testovacího kritéria
  - při určité hladině významnosti splývá  $t_{krit}$  a  $x_{obs}$  - tato hladina významnosti se označuje *p-hodnota* (= nejnižší hladina významnosti, na níž zamítáme nulovou hypotézu).
- Podle výsledku testu zamítneme nebo přijmeme nulovou hypotézu
  - je-li  $H_0$  správná hypotéza a my ji zamítneme, dopouštíme se tzv. chyby I. druhu - pravděpodobnost výskytu této chyby je hladina významnosti  $\alpha$  ( $\Rightarrow$  spolehlivost testu je  $1-\alpha$ ).
$$P(T(X) \in W | H_0) = \alpha$$
  - je-li správná  $H_A$  a my přesto přijmeme  $H_0$ , dopouštíme se chyby II. druhu - sílou testu označujeme  $1-\beta$ .
$$P(T(X) \in V | H_A) = \beta$$
$$P(T(X) \in W | H_A) = 1 - \beta$$
  - pro kvalitní test je třeba najít kompromis mezi  $\alpha$  a  $\beta$

- při neznalosti hladiny významnosti rozhodujeme o zamítnutí  $H_0$  podle schématu na obrázku 22



**Obrázek 22: Schéma pro rozhodování o správnosti nulové hypotézy (založeno na hladinách významnosti 0,01 a 0,05)**

### 7.3 ANOVA test

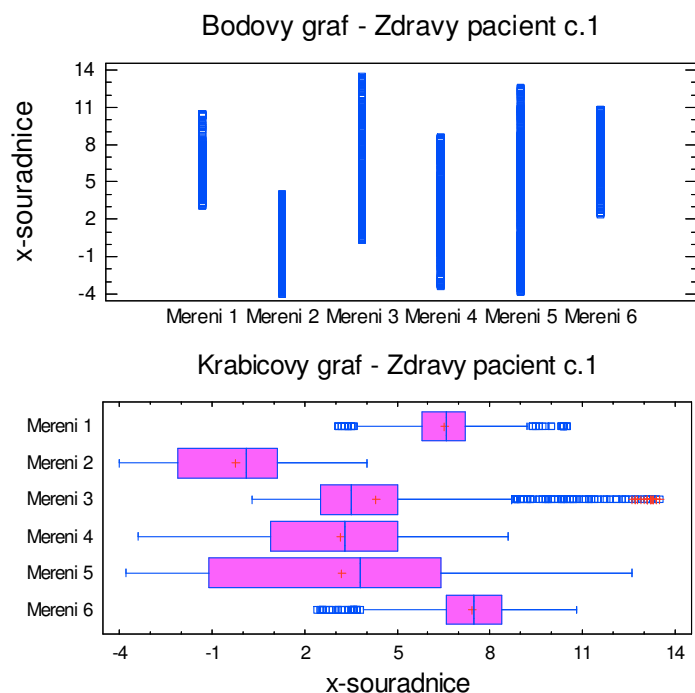
Jedná se o parametrický test středních hodnot (rozptylů) více než dvou populací s normálním rozdělením.

Na začátku testování se provádí explorační analýza (viz Kapitola 6.1). Podle matematických vztahů uvedených v kapitole 6.3 se vypočítají číselné charakteristiky datových souborů (viz Tabulka 1) a provede se jejich vizualizace v podobě krabicového nebo bodového grafu (vhodnější pro soubory menších rozsahů z důvodu překrývání bodů (Obrázek 23)).

Summary Statistics - Zdravy pacient c.1 (Ad) - x-souradnice

	Count	Avarage	Variance	Std.deviation	Min	Max	Range	Std.skewness	Std.kurtosis
Mereni 1	1500	6.5206	1.31135	1.14514	3.1	10.5	7.4	0.678525	11.9491
Mereni 2	1500	-0.244133	4.17242	2.04265	-4.0	4.0	8.0	1.63881	-7.3412
Mereni 3	1500	4.2952	6.85601	2.6184	0.3	13.5	13.2	22.9067	13.7774
Mereni 4	1500	3.15047	8.33352	2.88678	-3.4	8.6	12.0	0.176469	-6.4055
Mereni 5	1500	3.18067	16.8933	4.11015	-3.8	12.6	16.4	1.43125	-8.67947
Mereni 6	1500	7.4196	2.53293	1.59152	2.4	10.8	8.4	-9.24967	3.47903
Total	9000	4.05373	12.934	3.59639	-4	13.5	17.5	-10.6708	-14.7112

**Tabulka 1: Příklad výpočtu číselných charakteristik [STATGRAPHICS]**



**Obrázek 23: Příklad bodového grafu (nahore) a krabicového grafu (dole) zdravého pacienta Ad [STATGRAPHICS]**

Pomocí krabicového grafu můžeme identifikovat odlehlá pozorování, díky kterým nelze provést analýzu rozptylu. V případě odlehlých pozorování původu hrubých chyb, překlepů, selhání lidského faktoru či chybně zvolení metody... vynecháme tato odlehlá pozorování v další analýze. Pokud to nelze pokračujeme v analýze pomocí Kruskal-Wallis testu (viz Kapitola 7.4).

Předpoklady k užití ANOVA testu:

- nezávislost výběrů (Friedmanův test)
- normalita dat (Shapiro-Wilk test)
- homoskedasticita (identické rozptyly, např. Bartlettův test)

Jakmile není dodržen některý z předpokladů, používá se k analýze dat Kruskal-Wallis test.

## 7.4 KRUSKAL-WALLIS test

Kruskal-Wallis (K-W) test se někdy označuje jako neparametrická ANOVA [8]. Aplikuje se pro vícevýběrové testování shody mediánů ( $x_{0.5}$ ) dat nesplňujících předpoklady pro ANOVA testování.

Testuje se nulová hypotéza (pro  $k$  výběrů o rozsahu  $n$ ):

$$H_0: x_{0,5_1} = x_{0,5_2} = x_{0,5_3} = \dots = x_{0,5_k} \quad (7.1)$$

Alternativní hypotéza:  $H_0$  neplatí (negace  $H_0$ )

Výpočet pozorované hodnoty testování se provádí podobně jako u Mann-Whitney testu<sup>10</sup>: všechny pozorované hodnoty veličiny  $X_{ij}$  se seřadí do rostoucí posloupnosti a určí se jejich pořadí  $R_{ij}$ . Tyto pořadí se uspořádají do tabulky a určí se jejich součty pořadí pro jednotlivé výběry  $T_i$  (Tabulka 2).

Výběr	Pořadí veličin $X_{ij}$ v uspořádané rostoucí posloupnosti				Součty pořadí
1	$R_{11}$	$R_{12}$	...	$R_{1n1}$	$T_1$
2	$R_{21}$	$R_{22}$	...	$R_{2n2}$	$T_2$
. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .
k	$R_{k1}$	$R_{k2}$	...	$R_{knk}$	$T_k$

**Tabulka 2: Tabulka k výpočtu pozorované hodnoty [8]**

Celkový součet pořadí:

$$T_1 + T_2 + \dots + T_k = \frac{n(n+1)}{2} \quad (7.2)$$

Testová statistika (kritické hodnoty jsou tabelovány):

$$Q = -3(n+1) + \frac{12}{n(n+1)} \sum_{i=1}^k \frac{T_i^2}{n_i} - 3(n+1) \quad (7.3)$$

$p$ -hodnota =  $1 - F_0(x_{OBS})$ , kde  $F_0(x)$  je distribuční funkce  $X^2$ <sup>11</sup> rozložení s  $k-1$  stupněm volnosti.

<sup>10</sup> Mann-Whitney test viz literatura [8]

<sup>11</sup> Pearsonovo rozdělení viz literatura [8]

## 7.5 Výpočty charakteristických veličin

Střední hodnota souřadnice x ( $\mu_x$ ) a souřadnice y ( $\mu_y$ ) bodu COP

$$\begin{aligned}\mu_x &= \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, n = 1500 \text{ (počet hodnot v měření)} \\ \mu_y &= \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}, n = 1500 \text{ (počet hodnot v měření)}\end{aligned}\tag{7.4}$$

Ideální pozice

$$COP_{mean}[\mu_x, \mu_y], \text{ (viz \textcircled{2}vni\textcircled{2} (7.4))}\tag{7.5}$$

Vzdálenost bodů od ideální pozice

$$L_{mean\ i} = \sqrt{(x_i - \mu_x)^2 + (y_i - \mu_y)^2}, i = 1:n\tag{7.6}$$

Vzdálenost dvou následujících bodů COP

$$L_{AB\ i} = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}, i = 1:n - 1\tag{7.7}$$

Velikost úhlu mezi dvěma body COP vzhledem k ideální pozici:

$$\varphi_i = \tan^{-1}\left(\frac{|x_i|}{|y_i|}\right), i = 1:n ; \varphi_i = \varphi_{i+1} - \varphi_i, i = 1:n - 1\tag{7.8}$$

Diference souřadnic x a y bodu COP

$$\begin{aligned}diff_x &= (x_{i+1} - x_i), i = 1:n - 1 \\ diff_y &= (y_{i+1} - y_i), i = 1:n - 1\end{aligned}\tag{7.9}$$

Celková délka dráhy COP

$$L_c = \sum_{i=1}^N (L_{AB\ i}), N = n - 1, \text{ (viz \textcircled{2}vni\textcircled{2} (7.7))}\tag{7.10}$$

K výpočtům byl požíván program MATLAB, k testování hypotéz byl používán program STATGRAPHICS Plus Application Software.



## 7.6 Stanovení hypotéz

Pro testování se stanovily základní otázky (nulové hypotézy):

1. Hypotézy o vzdálenosti COP od jeho ideální pozice:
  - a) Je nutné počítat se všemi 6 posturometrickými měřeními pro testování střední vzdálenosti od ideální pozice u zdravých/nemocných pacientů?
  - b) Jsou srovnatelné střední vzdálenosti od ideální pozice mezi zdravými/nemocnými pacienty?
2. Hypotézy o střední vzdálenosti dvou následujících bodů COP:
  - a) Je nutné počítat se všemi 6 posturometrickými měřeními pro testování střední vzdálenosti dvou následujících bodů COP u zdravých/nemocných pacientů?
  - b) Jsou srovnatelné střední vzdálenosti dvou následujících bodů COP mezi zdravými/nemocnými pacienty?
3. Hypotézy o velikosti úhlu mezi dvěma body COP vzhledem k ideální pozici:
  - a) Je nutné počítat se všemi 6 posturometrickými měřeními pro testování střední velikosti úhlu mezi dvěma body COP vzhledem k ideální pozici u zdravých/nemocných pacientů?
  - b) Jsou srovnatelné střední velikosti úhlu mezi dvěma body COP vzhledem k ideální pozici mezi zdravými/nemocnými pacienty?
4. Hypotézy o celkové délce dráhy COP:

Jsou srovnatelné střední celkové dráhy COP mezi zdravými/nemocnými pacienty?
5. Hypotézy o rozdílech (diferencích) souřadnic x bodů COP:
  - a) Je nutné počítat se všemi 6 posturometrickými měřeními pro testování střední diferencí x u zdravých/nemocných pacientů?
  - b) Jsou srovnatelné střední difference souřadnic x mezi zdravými/nemocnými pacienty?
6. Hypotézy o rozdílech (diferencích) souřadnic y bodů COP:
  - a) Je nutné počítat se všemi 6 posturometrickými měřeními pro testování střední diferencí y u zdravých/nemocných pacientů?
  - b) Jsou srovnatelné střední difference souřadnic y mezi zdravými/nemocnými pacienty?
7. Srovnání zdravých a nemocných pacientů:
  - a) Stanovení středních hodnot (mediánů) ke srovnání.
  - b) Stanovení intervalových odhadů pro zdravé a nemocné pacienty.

Alternativní hypotézou ke každé nulové hypotéze je její negace.

## 8 Výsledky testování

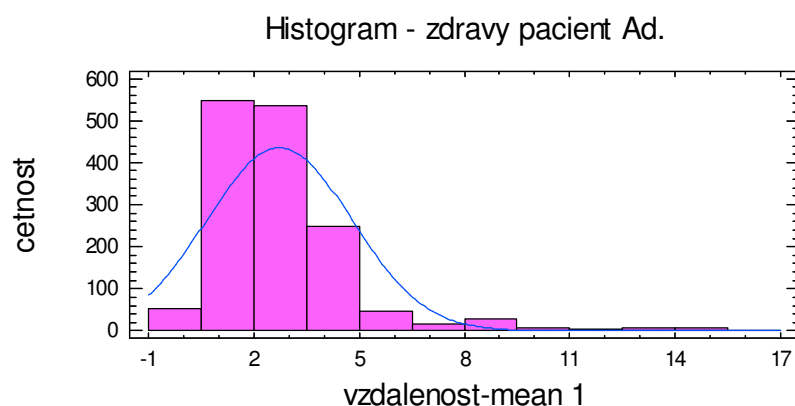
Testování probíhá na hladině významnosti  $\alpha = 0.05$  pomocí programu STATGRAPHICS. Výsledky všech testů (tabulky) a grafy jsou na přiloženém CD<sup>12</sup>.

**$H_{01}$ :** Je nutné provádět všech 6 posturometrických měření pro testování střední vzdálenosti od ideální pozice zdravého pacienta.  $\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_6$

**$H_{A1}$ :**  $H_{01}$  neplatí.

1. Ověření předpokladu normality a homoskedasticity dat pro ANOVA test:

Z obrázku 24 je patrné, že se nejedná o normální rozdělení, jelikož modrá křivka hustoty pravděpodobnosti v grafu společně s histogramem nemá tvar „gaussova zvonu“ (viz Kapitola 6.4.1). Domněnka o nenormálním rozdělení dat je ověřena Shapiro-Wilk testem -  $H_0$ : Data s normálním rozložením,  $H_A$ :  $H_0$  neplatí, p-value <  $\alpha \dots H_0$  se zamítá (Tabulka 3).



Obrázek 24: Histogram - zdravý pacient Ad., měření 1 - vzdálenost COP od ideální pozice

```
Tests for Normality for vzdálenost_mean 1
Computed Chi-Square goodness-of-fit statistic = 592,133
P-Value = 0,0
Shapiro-Wilks W statistic = 0,789638
P-Value = 0,0
Z score for skewness = 16,8053
P-Value = 0,0
Z score for kurtosis = 15,0101
P-Value = 0,0
```

Tabulka 3: Test normality - zdravý pacient Ad., měření 1 - vzdálenost COP od ideální pozice

<sup>12</sup> výsledky testů normality, Kruskal-Wallis test (resp. Wilcoxon test), Post hoc analýza, statistické charakteristiky - „testovani\_statgraphics\zdravi (nemocni, srovnani)“

Analogicky bylo ověřeno všech 5 zbylých vypočítaných vzdáleností COP od ideální pozice pacienta Ad. (pro měření 2-6) a pacienty Dv1, Dv2, Ha1 a No se stejným výsledkem - zamítnutí nulové hypotézy = data nepocházejí z normálního rozložení.

Jelikož je již porušen jeden předpoklad pro ANOVA test, není třeba ověřovat shodu rozptylů dat. Je nutné použít KRUSKALL-WALLIS test pro testování mediánů.

Nastává modifikace hypotézy:

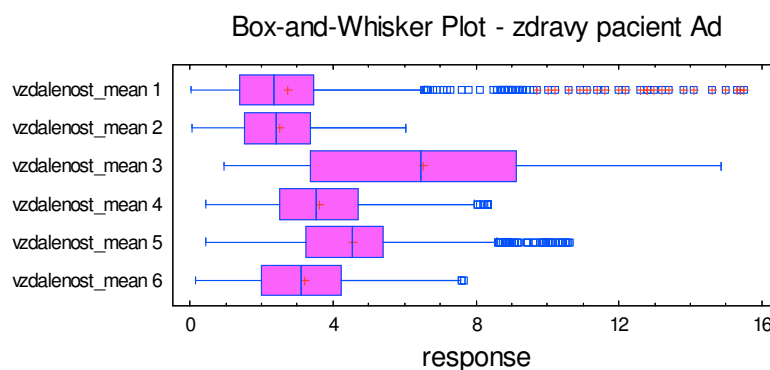
$H_0: x_{0,5_1} = x_{0,5_2} = \dots = x_{0,5_6}$

$H_A: H_0$  neplatí

## 2. KRUSKALL-WALLIS test

Z obrázku 25 je patrné, že jednotlivé vzdálenosti vypočítané z měření zdravého pacienta Ad mají spoustu odlehlých pozorování (způsobené větším výkyvem pacienta na plošině z důvodu udržení rovnováhy). Porovnáním krabicových grafů je zřejmé, že se mediány nebudou rovnat, tzn., že s největší pravděpodobností dojde k zamítnutí nulové hypotézy. Což bylo dokázáno K-W testem (Tabulka 4) -  $p\text{-Value}=0 < \alpha \dots H_0$  se zamítá.

Nulová hypotéza se zamítla také u ostatních zdravých pacientů (Dv1, Dv2, Ha1 a No).



**Obrázek 25: Krabicový graf**

Kruskall-Wallis Test

	Sample Size	Average Rank
vzdalenost_mean 1	1500	3060,9
vzdalenost_mean 2	1500	2979,85
vzdalenost_mean 3	1500	6525,53
vzdalenost_mean 4	1500	4641,34
vzdalenost_mean 5	1500	5781,42
vzdalenost_mean 6	1500	4013,96

Test statistic = 2307,05    P-Value = 0,0

**Tabulka 4: Kruskall-Wallis test**

### 3. Post hoc analýza

Tato analýza nám ukazuje srovnání jednotlivých měření mezi sebou při zamítnutí nulové hypotézy. Tím odhaluje, mezi kterými daty jsou velké rozdíly. U pacienta Ad jsou výrazné statistické rozdíly mezi každým měřením (Tabulka 5 - sloupec „Difference“). Názornějším ukazatelem homogenity měření jsou křížky ve sloupci „Homogeneous groups“ - všechny jsou od sebe vzájemně posunuté = žádná měření si nejsou statisticky podobná.

Multiple Range Tests			
Method: 95,0 percent Bonferroni			
	Count	Mean	Homogeneous Groups
vzdalen_mean 2	1500	2,50666	X
vzdalen_mean 1	1500	2,7299	X
vzdalen_mean 6	1500	3,20003	X
vzdalen_mean 4	1500	3,62383	X
vzdalen_mean 5	1500	4,53992	X
vzdalen_mean 3	1500	6,5354	X
Contrast	Difference		+/- Limits
vzdalen_mean 1 - vzdalen_mean 2	*0,223237		0,22211
vzdalen_mean 1 - vzdalen_mean 3	*-3,80551		0,22211
vzdalen_mean 1 - vzdalen_mean 4	*-0,833937		0,22211
vzdalen_mean 1 - vzdalen_mean 5	*-1,80343		0,22211
vzdalen_mean 1 - vzdalen_mean 6	*-0,470131		0,22211
vzdalen_mean 2 - vzdalen_mean 3	*-4,02874		0,22211
vzdalen_mean 2 - vzdalen_mean 4	*-1,11717		0,22211
vzdalen_mean 2 - vzdalen_mean 5	*-2,03266		0,22211
vzdalen_mean 2 - vzdalen_mean 6	*-0,693368		0,22211
vzdalen_mean 3 - vzdalen_mean 4	*2,81157		0,22211
vzdalen_mean 3 - vzdalen_mean 5	*1,99608		0,22211
vzdalen_mean 3 - vzdalen_mean 6	*3,33538		0,22211
vzdalen_mean 4 - vzdalen_mean 5	*-0,91549		0,22211
vzdalen_mean 4 - vzdalen_mean 6	*0,423806		0,22211
vzdalen_mean 5 - vzdalen_mean 6	*1,3393		0,22211

\* denotes a statistically significant difference.

**Tabulka 5: Post hoc analýza pro K-W test (pacient Ad)**

I když došlo k zamítnutí nulové hypotézy i u ostatních testovaných souborů pro zdravé pacienty, post hoc analýza nám ukazuje schodu mezi některými měřeními. Shoda je reprezentována křížky ve sloupci „Homogeneous groups“ těsně nad sebou (např. u pacienta Dv1 je shoda mezi vzdálenostmi pro měření vzdalen\_mean {3-5}, {1-6} a {2-4} viz Tabulka 6).

Multiple Range Tests			
Method: 95,0 percent Bonferroni			
	Count	Mean	Homogeneous Groups
vzdalen_mean 3	1500	4,37487	X
vzdalen_mean 5	1500	4,64533	X
vzdalen_mean 1	1500	5,53323	X
vzdalen_mean 6	1500	5,62645	X
vzdalen_mean 4	1500	6,78128	X
vzdalen_mean 2	1500	6,94488	X

**Tabulka 6: Post hoc analýza, vzdálenost COP od ideální pozice, pacient Dv1**

Pacient Dv2: zanedbatelný statistický rozdíl je mezi soubory dat vzdalen\_mean {4, 5} a {5, 6}. Mezi daty uvnitř skupinek nejsou žádné statisticky významné rozdíly.

Pacient Ha: zanedbatelný statistický rozdíl je mezi soubory vzdalen\_mean {1, 2, 5} a {1, 2, 3}. Mezi daty uvnitř skupinek nejsou žádné statisticky významné rozdíly.

Pacient No: mezi skupinami souborů dat vzdalen\_mean {1}, {3}, {4} a {2, 5, 6} je výrazný statistický rozdíl. Mezi daty uvnitř skupinek nejsou žádné statisticky významné rozdíly.

***H<sub>02</sub>: Střední vzdálenosti od ideální pozice jsou mezi zdravými pacienty srovnatelné.***

$$\mu_{Ad} = \mu_{Dv1} = \mu_{Dv2} = \mu_{Ha} = \mu_{No}$$

***H<sub>A2</sub>: H<sub>02</sub> neplatí.***

1. Ověření předpokladu normality a homoskedasticity dat pro ANOVA test:

P-Value <  $\alpha$ ... H<sub>0</sub> se zamítá pro data pacienta Ad. Data nepochází z populace s normálním rozložením (Tabulka 7).

Testy dalších zdravých pacientů (Dv1, Dv2, Ha a No) se stejným výsledkem zamítající nulovou hypotézu o normálním rozdělení.

Pro ANOVA test byla porušena podmínka o normalitě dat, proto už není třeba testovat shodu rozptylů.

```
Tests for Normality for vzdalenost_mean Ad
Computed Chi-Square goodness-of-fit statistic = 3037,07
P-Value = 0,0

Too many observations to conduct Shapiro-Wilks test.

Z score for skewness = 30,4016
P-Value = 0,0

Z score for kurtosis = 22,3172
P-Value = 0,0
```

**Tabulka 7: Test normality vzdálenost COP od ideální pozice (zdravý pacient Ad)**

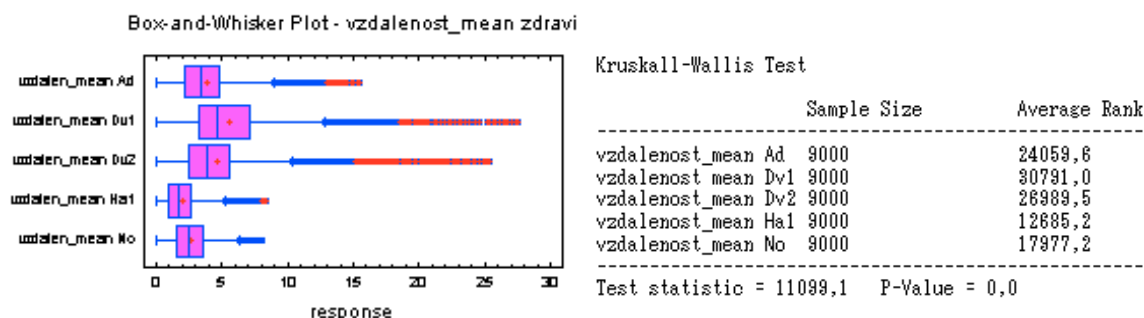
Modifikace hypotéz:

$$H_0: x_{0,5Ad} = x_{0,5Dv1} = \dots = x_{0,5No}$$

H<sub>A</sub>: H<sub>0</sub> neplatí

2. KRUSKALL-WALLIS test

Ve srovnání mediánů zdravých pacientů pro vypočítanou vzdálenost COP bodů od ideální pozice dochází k viditelným rozdílům (Obrázek 26). Tyto rozdíly byly potvrzeny i Kruskall-Wallis testem (Tabulka 8) - p-Value <  $\alpha$ ... H<sub>0</sub> se zamítá.



**Obrázek 26 (vpravo): Krabicový graf pro vzdálenost bodů COP od ideální pozice - zdraví pacienti**

**Tabulka 8 (vlevo): Výsledek K-W testu pro vzdálenost bodů COP od ideální pozice - zdraví pacienti**

### 3. Post hoc analýza

Porovnáním skupin navzájem je po grafickém znázornění zřejmé, že statisticky významné rozdíly v mediánu jsou mezi všemi zdravými pacienty (Tabulka 9).

Multiple Range Tests

---

Method: 95,0 percent Bonferroni

	Count	Mean	Homogeneous Groups
vzdalen_meanHa1	9000	1,99052	X
vzdalen_meanNo	9000	2,65319	X
vzdalen_meanAd	9000	3,85586	X
vzdalen_meanDv2	9000	4,65543	X
vzdalen_meanDv1	9000	5,65267	X

---

Contrast	Difference	+/- Limits
vzdalen_meanAd - vzdalen_meanDv1	*-1,79681	0,111856
vzdalen_meanAd - vzdalen_meanDv2	*-0,799575	0,111856
vzdalen_meanAd - vzdalen_meanHa1	*1,86534	0,111856
vzdalen_meanAd - vzdalen_meanNo	*1,20267	0,111856
vzdalen_meanDv1 - vzdalen_meanDv2	*0,997239	0,111856
vzdalen_meanDv1 - vzdalen_meanHa1	*3,66215	0,111856
vzdalen_meanDv1 - vzdalen_meanNo	*2,99948	0,111856
vzdalen_meanDv2 - vzdalen_meanHa1	*2,66491	0,111856
vzdalen_meanDv2 - vzdalen_meanNo	*2,00224	0,111856
vzdalen_meanHa1 - vzdalen_meanNo	*-0,662669	0,111856

---

\* denotes a statistically significant difference.

**Tabulka 9: Post hoc analýza vzdáleností COP bodů od ideální pozice pro zdravé pacienti**

***H<sub>03</sub>: Je nutné počítat se všemi 6 posturometrickými měřeními pro testování střední vzdálenosti od ideální pozice u nemocných pacientů.  $\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_6$***

***H<sub>A3</sub>: H<sub>03</sub> neplatí.***

1. Ověření předpokladu normality a homoskedasticity dat pro ANOVA test:

P-Value <  $\alpha$ ... H<sub>0</sub> se zamítá pro střední vzdálenosti od ideální pozice. Data nepochází z populace s normálním rozložením.

Testy všech 6 měření nemocných pacientů (Ba1, Ba2, Du, St1 a St2) vyšly se stejným výsledkem zamítající nulovou hypotézu o normálním rozdělení.

Pro ANOVA test byla porušena podmínka o normalitě dat, proto už není třeba testovat shodu rozptylů.

Modifikace hypotéz:

H<sub>0</sub>:  $x_{0,5_1} = x_{0,5_2} = \dots = x_{0,5_6}$

H<sub>A</sub>: H<sub>0</sub> neplatí

2. KRUSKALL-WALLIS test

Nulová hypotéza se zamítá v případech všech nemocných pacientů (Ba1, Ba2, Du, St1, St2) mezi jednotlivými měřeními. P-Value <  $\alpha$ .

3. Post hoc analýza

Pacient Ba1: statisticky významný rozdíl nastává mezi skupinami dat vzdal\_mean\_{1, 3}, {2, 4, 6} a {5}. Mezi soubory dat uvnitř skupin jsou rozdíly zanedbatelné.

Pacient Ba2: statisticky významný rozdíl nastává mezi skupinami dat vzdal\_mean\_{1}, {2, 4, 6}, {2, 3, 6} a {5}. Mezi soubory dat uvnitř skupin jsou rozdíly zanedbatelné.

Pacient Du: statisticky významný rozdíl nastává mezi skupinami dat vzdal\_mean\_{1, 2, 3}, {4}, {5} a {6}. Mezi soubory dat uvnitř skupin jsou rozdíly zanedbatelné.

Pacient St1: statisticky významný rozdíl nastává mezi skupinami dat vzdal\_mean\_{1, 4}, {4, 6}, {5} a {2, 3}. Mezi soubory dat uvnitř skupin jsou rozdíly zanedbatelné.

Pacient St2: statisticky významný rozdíl nastává mezi skupinami dat vzdal\_mean\_{1}, {2, 3, 5}, {4} a {6}. Mezi soubory dat uvnitř skupin jsou rozdíly zanedbatelné.

***H<sub>04</sub>: Střední vzdálenosti od ideální pozice jsou mezi nemocnými pacienty***

***srovnatelné.  $\mu_{Ba1} = \mu_{Ba2} = \mu_{Du} = \mu_{St1} = \mu_{St2}$***

***H<sub>A4</sub>: H<sub>04</sub> neplatí.***

1. Ověření předpokladu normality a homoskedasticity dat pro ANOVA test:

P-Value <  $\alpha$ ... H<sub>0</sub> se zamítá pro střední vzdálenosti od ideální pozice. Data nepochází z populace s normálním rozložením.

Testy normality všech nemocných pacientů (Ba1, Ba2, Du, St1 a St2) vyšly se stejným výsledkem zamítající nulovou hypotézu o normálním rozdělení.

Pro ANOVA test byla porušena podmínka o normalitě dat, proto už není třeba testovat shodu rozptylů.

Modifikace hypotéz:

$$H_0: x_{0,5_{Ba1}} = x_{0,5_{Ba2}} = x_{0,5_{Du}} = x_{0,5_{St1}} = x_{0,5_{St2}}$$

$H_A$ :  $H_0$  neplatí

## 2. KRUSKALL-WALLIS test

P-Value <  $\alpha$  ... nulová hypotéza se zamítá. Střední vzdálenost od ideální pozice nemocných pacientů nejsou srovnatelné.

## 3. Post hoc analýza

Statisticky významný rozdíl nastává mezi skupinami dat vzdal\_mean\_{Ba1, Du}, {Ba2}, {St1} a {St2}. Mezi soubory dat uvnitř skupin jsou rozdíly zanedbatelné.

***$H_{05}$ : Je nutné počítat se všemi 6 posturometrickými měřeními pro testování střední***

***vzdálenosti dvou následujících bodů COP u zdravých pacientů.  $\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_6$***

***$H_{A5}$ :  $H_{05}$  neplatí.***

## 1. Ověření předpokladu normality a homoskedasticity dat pro ANOVA test:

P-Value <  $\alpha$ ...  $H_0$  se zamítá pro střední vzdálenosti dvou COP pozic. Data nepochází z populace s normálním rozložením.

Testy všech 6 měření zdravých pacientů (Ad, Dv1, Dv2, Ha a No) vyšly se stejným výsledkem zamítající nulovou hypotézu o normálním rozdělení.

Pro ANOVA test byla porušena podmínka o normalitě dat, proto už není třeba testovat shodu rozptylů.

Modifikace hypotéz:

$$H_0: x_{0,5_1} = x_{0,5_2} = \dots = x_{0,5_6}$$

$H_A$ :  $H_0$  neplatí

## 2. KRUSKALL-WALLIS test

Nulová hypotéza se zamítá v případech všech zdravých pacientů (Ad, Dv1, Dv2, Ha, No) mezi jednotlivými měřeními. P-Value <  $\alpha$ .

## 3. Post hoc analýza

Pacient Ad: homogenita dat na základě statistického šetření nastává mezi soubory vzdálenost1x2\_{2, 4, 5}, {1, 2, 3, 5} a {1, 3, 5, 6}. Mezi skupinkami nastává statisticky významný rozdíl.



Pacient Dv1: významný statistický rozdíl se objevuje mezi skupinkami dat vzdalenost1x2\_{1, 4, 6}, {1, 5, 6}, {2} a {3}.

Pacient Dv2: významný statistický rozdíl se objevuje mezi skupinkami dat vzdalenost1x2 {4, 6}, {2, 3, 5} a {1}.

Pacienta Ha: výrazné statistické rozdíly mezi skupinkami souborů dat vzdalenos1x2\_{2, 4, 5, 6} a {1, 3}.

Pacient No: významný statistický rozdíl se objevuje mezi skupinkami dat vzdalenost1x2\_{1, 3} a {2, 4, 5, 6}.

***H<sub>06</sub>: Střední vzdálenosti dvou COP bodů jsou mezi zdravými pacienty srovnatelné.***

$$\mu_{Ad} = \mu_{Dv1} = \dots = \mu_{No}$$

***H<sub>A6</sub>: H<sub>06</sub> neplatí.***

1. Ověření předpokladu normality a homoskedasticity dat pro ANOVA test:

P-Value <  $\alpha$ ... H<sub>0</sub> se zamítá. Data nepochází z populace s normálním rozložením.

Zamítnutí nulové hypotézy o normalitě výběru nastalo v případě všech zdravých pacientů.

Testování shody rozptylů již není nutné.

Modifikace hypotéz:

$$H_0: x_{0,5Ad} = x_{0,5Dv1} = \dots = x_{0,5No}$$

H<sub>A</sub>: H<sub>0</sub> neplatí

2. KRUSKALL-WALLIS test

Kruskall-Wallis test zamítá nulovou hypotézu - p-Value <  $\alpha$ ... H<sub>0</sub> se zamítá. Shoda mediánů vzdálenosti COP bodů mezi zdravými pacienty není.

3. Post hoc analýza

Výrazných statistické rozdíly mezi všemi soubory dat vzdalenos1x2\_{Ad}, {Dv1}, {Dv2}, {Ha} a {No}.

***H<sub>07</sub>: Je nutné počítat se všemi 6 posturometrickými měřeními pro testování střední***

***vzdálenosti dvou následujících bodů COP u nemocných pacientů.  $\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_6$***

***H<sub>A7</sub>: H<sub>07</sub> neplatí.***

1. Ověření předpokladu normality a homoskedasticity dat pro ANOVA test:

P-Value <  $\alpha$ ... H<sub>0</sub> se zamítá pro střední vzdálenosti dvou následujících COP bodů. Data nepochází z populace s normálním rozložením.

Testy všech 6 měření nemocných pacientů (Ba1, Ba2, Du, St1 a St2) vyšly se stejným výsledkem zamítající nulovou hypotézu o normálním rozdělení.

Pro ANOVA test byla porušena podmínka o normalitě dat, proto už není třeba testovat shodu rozptylů.

Modifikace hypotéz:

$$H_0: x_{0,5_1} = x_{0,5_2} = \dots = x_{0,5_6}$$

$H_A$ :  $H_0$  neplatí

## 2. KRUSKALL-WALLIS test

Nulová hypotéza se zamítá v případech všech nemocných pacientů (Ba1, Ba2, Du, St1, St2) mezi jednotlivými měřeními.  $P\text{-Value} < \alpha$ .

## 3. Post hoc analýza

Pacient Ba1: statisticky významný rozdíl nastává mezi skupinami dat vzdal1x2\_{1, 3, 5}, {2, 4} a {6}. Mezi soubory dat uvnitř skupin jsou rozdíly zanedbatelné.

Pacient Ba2: statisticky významný rozdíl nastává mezi skupinami dat vzdal1x2\_{1, 5}, {3, 4}, {3, 6} a {2}. Mezi soubory dat uvnitř skupin jsou rozdíly zanedbatelné.

Pacient Du: statisticky významný rozdíl nastává mezi skupinami dat vzdal1x2\_{1, 2, 3, 4}, {5} a {6}. Mezi soubory dat uvnitř skupin jsou rozdíly zanedbatelné.

Pacient St1: statisticky významný rozdíl nastává mezi skupinami dat vzdal1x2\_{1, 2, 3, 6}, {5, 6} a {4}. Mezi soubory dat uvnitř skupin jsou rozdíly zanedbatelné.

Pacient St2: statisticky významný rozdíl nastává mezi skupinami dat vzdal1x2\_{1, 3}, {1, 5}, {4, 5} a {2, 6}. Mezi soubory dat uvnitř skupin jsou rozdíly zanedbatelné.

**$H_{08}$ : Střední vzdálenosti dvou COP bodů jsou mezi nemocnými pacienty srovnatelné.**

**$H_{A8}$ :  $H_{08}$  neplatí.**  $\mu_{Ba1} = \mu_{Ba2} = \dots = \mu_{St2}$

## 1. Ověření předpokladu normality a homoskedasticity dat pro ANOVA test:

Testy všech 6 měření nemocných pacientů (Ba1, Ba2, Du, St1 a St2) vyšly se stejným výsledkem zamítající nulovou hypotézu o normálním rozdělení.

Pro ANOVA test byla porušena podmínka o normalitě dat, proto už není třeba testovat shodu rozptylů.

Modifikace hypotéz:

$$H_0: x_{0,5_{Ba1}} = x_{0,5_{Ba2}} = x_{0,5_{Du}} = x_{0,5_{St1}} = x_{0,5_{St2}}$$

$H_A$ :  $H_0$  neplatí

## 2. KRUSKALL-WALLIS test

Nulová hypotéza se zamítá u všech nemocných pacientů (Ba1, Ba2, Du, St1, St2) mezi jednotlivými měřeními.  $P\text{-Value} < \alpha$ .

### 3. Post hoc analýza

Statisticky významný rozdíl nastává mezi každými soubory dat vzdal1x2\_{Ba1}, {Ba2}, {Du}, {St1} a {St2}.

**$H_{09}$ : Je nutné počítat se všemi 6 posturometrickými měřeními pro testování střední velikosti úhlu mezi dvěma body COP vzhledem k ideální pozici u zdravých pacientů.  $\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_6$**

**$H_{A9}$ :  $H_{09}$  neplatí.**

#### 1. Ověření předpokladu normality a homoskedasticity dat pro ANOVA test:

$P\text{-Value} < \alpha \dots H_0$  se zamítá pro střední velikosti úhlu mezi dvěma body COP vzhledem k ideální pozici. Data nepochází z populace s normálním rozložením.

Testy všech 6 měření zdravých pacientů (Ad, Dv1, Dv2, Ha a No) vyšly se stejným výsledkem zamítající nulovou hypotézu o normálním rozdělení.

Pro ANOVA test byla porušena podmínka o normalitě dat, proto už není třeba testovat shodu rozptylů.

Modifikace hypotéz:

$H_0: x_{0,5_1} = x_{0,5_2} = \dots = x_{0,5_6}$

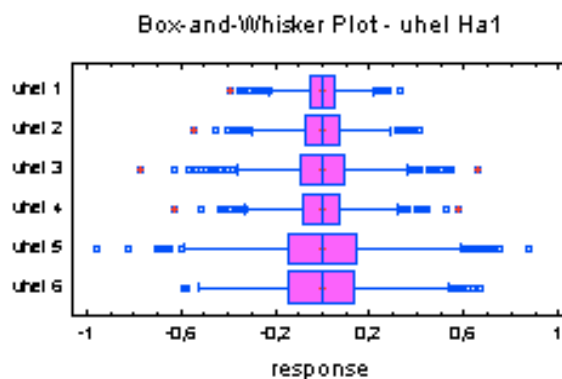
$H_A: H_0$  neplatí

#### 2. KRUSKALL-WALLIS test

Výraznou shodu můžeme vidět již ve srovnání krabicových grafů pro jednotlivá měření pacienta (Obrázek 27). Výsledek potvrzuje i Kruskal-Wallis test (Tabulka 10).

Hodnota  $p\text{-Value} = 0.650332$ , je větší než hladina významnosti  $\alpha \dots H_0$  se přijímá. Existuje shoda mezi mediány souborů dat - velikosti úhlů reprezentující jednotlivá měření pacienta Ha.

Nulová hypotéza se přijímá u všech zdravých pacientů.



**Obrázek 27: Krabicový graf - velikosti úhlů mezi COP body pacienta Ha pro měření 1-6**

Kruskal-Wallis Test

	Sample Size	Average Rank
uhel 1	1499	4595,53
uhel 2	1499	4500,74
uhel 3	1499	4491,15
uhel 4	1499	4490,87
uhel 5	1499	4492,91
uhel 6	1499	4479,8
-----		
Test statistic = 3,92293 P-Value = 0,650392		

**Tabulka 10: K-W test pacienta Ha pro velikosti úhlů mezi COP body.**

3. Post hoc analýza

Při přijetí nulové hypotézy se post hoc analýza neprovádí.

***H<sub>010</sub>: Střední velikosti úhlu mezi dvěma body COP vzhledem k ideální pozici mezi zdravými pacienty jsou srovnatelné.  $\mu_{Ad} = \mu_{Dv1} = \dots = \mu_{No}$***

***H<sub>A10</sub>: H<sub>010</sub> neplatí.***

1. Ověření předpokladu normality a homoskedasticity dat pro ANOVA test:

P-Value <  $\alpha$ ... H<sub>0</sub> se zamítá. Data nepochází z populace s normálním rozložením (platné pro všechny zdravé pacienty).

Modifikace hypotéz:

H<sub>0</sub>:  $x_{0,5Ad} = x_{0,5Dv1} = \dots = x_{0,5No}$

H<sub>A</sub>: H<sub>0</sub> neplatí

2. KRUSKALL-WALLIS test

Hodnota p-Value je téměř nulová. P-Value <  $\alpha$  ... H<sub>0</sub> se zamítá. Mezi zdravými pacienty pro střední velikosti úhlů mezi COP body není srovnání.

3. Post hoc analýza

Významný statistický rozdíl vzniká mezi daty pacienta {Dv2} a {Ad, Dv1, No}. Mezi daty uvnitř skupinek nejsou statisticky významné rozdíly.

***H<sub>011</sub>: Je nutné počítat se všemi 6 posturometrickými měřeními pro testování střední velikosti úhlu mezi dvěma body COP vzhledem k ideální pozici u nemocných pacientů.***

$$\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_6$$

***H<sub>A11</sub>: H<sub>011</sub> neplatí.***

1. Ověření předpokladu normality a homoskedasticity dat pro ANOVA test:

P-Value <  $\alpha$ ... H<sub>0</sub> se zamítá pro střední velikost úhlu mezi dvěma body COP vzhledem k ideální pozici. Data nepochází z populace s normálním rozdělením.

Testy všech 6 měření nemocných pacientů (Ba1, Ba2, Du, St1 a St2) vyšly se stejným výsledkem zamítající nulovou hypotézu o normálním rozdělení.

Pro ANOVA test byla porušena podmínka o normalitě dat, proto už není třeba testovat shodu rozptylů.

Modifikace hypotéz:

$$H_0: x_{0,5_1} = x_{0,5_2} = \dots = x_{0,5_6}$$

H<sub>A</sub>: H<sub>0</sub> neplatí

2. KRUSKALL-WALLIS test

Nulová hypotéza se zamítá u těchto nemocných pacientů - Ba1 a St2 (srovnání jednotlivých měření). P-Value <  $\alpha$ .

U ostatních nemocných pacientů (Ba2, Du, St1) je p-Value >  $\alpha$ ... nulová hypotéza se přijímá.

3. Post hoc analýza

Pacient Ba1: statisticky významný rozdíl nastává mezi skupinami dat uhel\_{1, 3, 5}, {2, 4} a {6}. Mezi soubory dat uvnitř skupin jsou rozdíly zanedbatelné.

Pacient Ba2, Du, St2: neprovádí se.

Pacient St2: Mezi soubory dat nejsou žádné statisticky významné rozdíly.

***H<sub>012</sub>: Jsou srovnatelné střední velikosti úhlu mezi dvěma body COP vzhledem k ideální pozici mezi nemocnými pacienty?  $\mu_{Ba1} = \mu_{Ba2} = \mu_{Du} = \mu_{St1} = \mu_{St2}$***

***H<sub>A12</sub>: H<sub>012</sub> neplatí.***

1. Ověření předpokladu normality a homoskedasticity dat pro ANOVA test:

P-Value <  $\alpha$ ... H<sub>0</sub>. Testy normality všech nemocných pacientů (Ba1, Ba2, Du, St1 a St2) vyšly se stejným výsledkem zamítající nulovou hypotézu o normálním rozdělení.

Pro ANOVA test byla porušena podmínka o normalitě dat, proto už není třeba testovat shodu rozptylů.

Modifikace hypotéz:

$$H_0: x_{0,5Ba1} = x_{0,5Ba2} = x_{0,5Du} = x_{0,5St1} = x_{0,5St2}$$

$H_A$ :  $H_0$  neplatí

2. KRUSKALL-WALLIS test

P-Value <  $\alpha$  ... nulová hypotéza se zamítá. Střední úhel mezi dvěma body COP vzhledem k ideální pozici nemocných pacientů nejsou srovnatelné.

3. Post hoc analýza

Mezi soubory dat není žádný statisticky významný rozdíl.

**$H_{013}$ : Střední celkové dráhy COP mezi zdravými pacienty jsou srovnatelné.**

$$\mu_{Ad} = \mu_{Dv1} = \dots = \mu_{No}$$

**$H_{A13}$ :  $H_{013}$  neplatí.**

1. Ověření předpokladu normality a homoskedasticity dat pro ANOVA test:

Nulová hypotéza se zamítá jen u pacienta Ha. P-Value <  $\alpha$ .

U ostatních zdravých pacientů (Ad, Dv1, Dv2, No) je p-Value >  $\alpha$ ... nulová hypotéza se přijímá - data mají normální rozložení.

V jednom případě je porušen předpoklad o normalitě dat (data pacienta Ha), proto i přes ostatní normální datová rozložení nelze použít ANOVA test.

Modifikace hypotéz:

$$H_0: x_{0,5As} = x_{0,5Dv1} = \dots = x_{0,5No}$$

$H_A$ :  $H_0$  neplatí

2. KRUSKALL-WALLIS test

Hodnota p-Value je téměř nulová. P-Value <  $\alpha$  ...  $H_0$  se zamítá. Střední celkové dráhy zdravých pacientů nejsou srovnatelné.

3. Post hoc analýza

Významné statistické rozdíly jsou mezi soubory pacientů  $\{Ha\}$ ,  $\{No\}$  a  $\{Ad, Dv1, Dv2\}$ . Mezi ostatními soubory dat významné rozdíly nejsou.

***H<sub>014</sub>: Střední celkové dráhy COP mezi nemocnými pacienty jsou srovnatelné.***

$$\mu_{Ba1} = \mu_{Ba2} = \mu_{Du} = \mu_{St1} = \mu_{St2}$$

***H<sub>A14</sub>: H<sub>014</sub> neplatí.***

1. Ověření předpokladu normality a homoskedasticity dat pro ANOVA test:

P-Value <  $\alpha$ ... H<sub>0</sub> se zamítá, pro střední celkovou dráhu dat pacienta Du.

Testy normality dat ostatních nemocných pacientů (Ba1, Ba2, St1 a St2) vyšly s výsledkem nezamítající nulovou hypotézu o normálním rozdělení (P-Value >  $\alpha$ ).

Pro ANOVA test byla porušena podmínka o normalitě dat, proto už není třeba testovat shodu rozptylů.

Modifikace hypotéz:

$$H_0: x_{0,5_{Ba1}} = x_{0,5_{Ba2}} = x_{0,5_{Du}} = x_{0,5_{St1}} = x_{0,5_{St2}}$$

H<sub>A</sub>: H<sub>0</sub> neplatí

2. KRUSKALL-WALLIS test

P-Value <  $\alpha$  ... nulová hypotéza se zamítá. Střední celková dráha nemocných pacientů nejsou srovnatelné.

3. Post hoc analýza

Statisticky významný rozdíl nastává mezi skupinami dat vzdal\_mean\_{Ba1, St2}, {Ba2}, {St1} a {Du}. Mezi soubory dat uvnitř skupin jsou rozdíly zanedbatelné.

***H<sub>015</sub>: Je nutné počítat se všemi 6 posturometrickými měřeními pro testování střední diferencí x u zdravých pacientů.  $\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_6$***

***H<sub>A15</sub>: H<sub>015</sub> neplatí.***

1. Ověření předpokladu normality a homoskedasticity dat pro ANOVA test:

Shapiro-Wilks test: p-Value <  $\alpha$ ... H<sub>0</sub> se zamítá. Data nepochází z populace s normálním rozložením.

Tento výsledek je platný pro všech 6 měření každého zdravého pacienta.

Modifikace hypotéz:

$$H_0: x_{0,5_1} = x_{0,5_2} = \dots = x_{0,5_6}$$

H<sub>A</sub>: H<sub>0</sub> neplatí

2. KRUSKALL-WALLIS test

Pacient Ad, Dv1, Dv2, Ha, No: p-Value >  $\alpha$ ... H<sub>0</sub> se přijímá - střední rozdíl mezi COP pozicemi mezi jednotlivými měřeními pacienta jsou srovnatelné.

3. Post hoc analýza  
Neprovádí se.

***H<sub>016</sub>: Střední difference souřadnic x mezi zdravými pacienty jsou srovnatelné.***

$$\mu_{Ad} = \mu_{Dv1} = \dots = \mu_{No}$$

***H<sub>A16</sub>: H<sub>016</sub> neplatí.***

1. Ověření předpokladu normality a homoskedasticity dat pro ANOVA test:  
P-Value <  $\alpha$ ... H<sub>0</sub> se zamítá. Data Ad, Dv1, Dv2, Ha a No nepochází z populace s normálním rozložením.

Modifikace hypotéz:

$$H_0: x_{0,5Ad} = x_{0,5Dv1} = \dots = x_{0,5No}$$

H<sub>A</sub>: H<sub>0</sub> neplatí

2. KRUSKALL-WALLIS test  
p-Value >  $\alpha$ ... H<sub>0</sub> se přijímá. Střední difference souřadnic x souřadnic u zdravých pacientů jsou srovnatelné.
3. Post hoc analýza  
Neprovádí se.

***H<sub>017</sub>: Je nutné počítat se všemi 6 posturometrickými měřeními pro testování střední difference x u nemocných pacientů.  $\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_6$***

***H<sub>A17</sub>: H<sub>017</sub> neplatí.***

1. Ověření předpokladu normality a homoskedasticity dat pro ANOVA test:  
P-Value <  $\alpha$ ... H<sub>0</sub> se zamítá pro střední rozdíly x souřadnice. Data nepochází z populace s normálním rozložením.  
Testy všech 6 měření nemocných pacientů (Ba1, Ba2, Du, St1 a St2) vyšly se stejným výsledkem zamítající nulovou hypotézu o normálním rozdělení.  
Pro ANOVA test byla porušena podmínka o normalitě dat, proto už není třeba testovat shodu rozptylů.

Modifikace hypotéz:

$$H_0: x_{0,5_1} = x_{0,5_2} = \dots = x_{0,5_6}$$

H<sub>A</sub>: H<sub>0</sub> neplatí



2. KRUSKALL-WALLIS test

Pacient Ba1, Du, St1, St2: P-Value  $> \alpha \dots H_0$  se přijímá. Střední rozdíly x souřadnice pacientů jsou srovnatelné.

PacientBa2: P-Value  $< \alpha \dots H_0$  se přijímá. Střední rozdíly x souřadnice pacienta Ba2 nejsou srovnatelné.

3. Post hoc analýza

Pacient Ba1, Du, St1, St2: neprovádí se.

PacientBa2: statisticky významný rozdíl není mezi žádnými soubory dat jednotlivých měření pacienta.

**$H_{018}$ : Střední difference souřadnic x mezi nemocnými pacienty jsou srovnatelné.**

$$\mu_{Ba1} = \mu_{Ba2} = \mu_{Du} = \mu_{St1} = \mu_{St2}$$

**$H_{A18}$ :  $H_{018}$  neplatí.**

1. Ověření předpokladu normality a homoskedasticity dat pro ANOVA test:

P-Value  $< \alpha \dots H_0$  se zamítá pro střední rozdíly x souřadnic pacienta Ba1. Data nepochází z populace s normálním rozložením.

Testy normality všech nemocných pacientů (Ba1, Ba2, Du, St1 a St2) vyšly se stejným výsledkem zamítající nulovou hypotézu o normálním rozdělení.

Pro ANOVA test byla porušena podmínka o normalitě dat, proto už není třeba testovat shodu rozptylů.

Modifikace hypotéz:

$$H_0: x_{0,5Ba1} = x_{0,5Ba2} = x_{0,5Du} = x_{0,5St1} = x_{0,5St2}$$

$H_A$ :  $H_0$  neplatí

2. KRUSKALL-WALLIS test

P-Value  $< \alpha \dots$  nulová hypotéza se zamítá. Střední vzdálenost rozdíly x souřadnic nemocných pacientů nejsou srovnatelné.

3. Post hoc analýza

Statisticky významný rozdíl nenastává mezi žádnými soubory dat  $\text{diff\_x\_}\{Ba1, Ba2, Du, St1, St2\}$ .

***H<sub>019</sub>: Je nutné počítat se všemi 6 posturometrickými měřeními pro testování střední diferencí y u zdravých pacientů.  $\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_6$***

***H<sub>A19</sub>: H<sub>019</sub> neplatí.***

1. Ověření předpokladu normality a homoskedasticity dat pro ANOVA test:  
P-Value <  $\alpha$ ... H<sub>0</sub> se zamítá. Data nepochází z populace s normálním rozložením.  
Tento výsledek je platný pro všech 6 měření každého zdravého pacienta.

Modifikace hypotéz:

H<sub>0</sub>:  $x_{0,5_1} = x_{0,5_2} = \dots = x_{0,5_6}$

H<sub>A</sub>: H<sub>0</sub> neplatí

2. KRUSKALL-WALLIS test

Pacient Ad, Dv1, Dv2: p-Value <  $\alpha$ ... H<sub>0</sub> se nepřijímá - střední rozdíly y souřadnic mezi jednotlivými měřeními pacienta nejsou srovnatelné.

Pacient Ha, No: p-Value >  $\alpha$ ... H<sub>0</sub> se přijímá - střední rozdíly y souřadnic mezi jednotlivými měřeními pacienta jsou srovnatelné.

3. Post hoc analýza

Pacient Ad: významný rozdíl nastává mezi skupinami souborů dat {3, 5, 6} a {1, 2, 4, 5, 6}. Mezi soubory dat uvnitř skupin nejsou statisticky významné rozdíly.

Pacient Dv1: významný rozdíl nenastává mezi žádnými soubory dat.

Pacient Dv2: Statisticky významný rozdíl nastává mezi souborem dat diff\_y {1} a {2} souborem dat.

Pacient Ha, No: Analýza se neprovádí.

***H<sub>020</sub>: Střední difference souřadnic y mezi zdravými pacienty jsou srovnatelné.***

$\mu_{Ad} = \mu_{Dv1} = \dots = \mu_{No}$

***H<sub>A20</sub>: H<sub>020</sub> neplatí.***

1. Ověření předpokladu normality a homoskedasticity dat pro ANOVA test:  
P-Value <  $\alpha$ ... H<sub>0</sub> se zamítá. Data pacientů Ad, Dv1, Dv2, Ha a No - rozdíly mezi y souřadnicemi nepochází z populace s normálním rozložením.

Modifikace hypotéz:

H<sub>0</sub>:  $x_{0,5_{Ad}} = x_{0,5_{Dv1}} = \dots = x_{0,5_{No}}$

H<sub>A</sub>: H<sub>0</sub> neplatí

2. KRUSKALL-WALLIS test

p-Value <  $\alpha$  ...  $H_0$  se zamítá. Diference souřadnic y posturometrických vyšetření není mezi zdravými pacienty srovnatelná.

3. Post hoc analýza

Mezi jednotlivými středními diferencemi souřadnic y mezi pacienty nejsou žádné statisticky významné rozdíly.

***$H_{021}$ : Je nutné počítat se všemi 6 posturometrickými měřeními pro testování střední diferencí y u nemocných pacientů?  $\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_6$***

***$H_{A21}$ :  $H_{021}$  neplatí.***

1. Ověření předpokladu normality a homoskedasticity dat pro ANOVA test:

P-Value <  $\alpha$ ...  $H_0$  se zamítá pro střední rozdíly y souřadnic. Data nepochází z populace s normálním rozložením.

Testy všech 6 měření nemocných pacientů (Ba1, Ba2, Du, St1 a St2) vyšly se stejným výsledkem zamítající nulovou hypotézu o normálním rozdělení.

Pro ANOVA test byla porušena podmínka o normalitě dat, proto už není třeba testovat shodu rozptylů.

Modifikace hypotéz:

$H_0$ :  $x_{0,5_1} = x_{0,5_2} = \dots = x_{0,5_6}$

$H_A$ :  $H_0$  neplatí

2. KRUSKALL-WALLIS test

Nulová hypotéza se přijímá u všech nemocných pacientů (Ba1, Ba2, Du, St1, St2) mezi jednotlivými měřeními pacientů je srovnání. P-Value >  $\alpha$ .

3. Post hoc analýza

Neprovádí se pro data žádného pacienta.

***$H_{022}$ : Střední diference souřadnic y mezi nemocnými pacienty jsou srovnatelné.***

$\mu_{Ba1} = \mu_{Ba2} = \mu_{Du} = \mu_{St1} = \mu_{St2}$

***$H_{A22}$ :  $H_{022}$  neplatí.***

1. Ověření předpokladu normality a homoskedasticity dat pro ANOVA test:

P-Value <  $\alpha$ ...  $H_0$  se zamítá. Data nepochází z populace s normálním rozložením.

Testy normality všech nemocných pacientů (Ba1, Ba2, Du, St1 a St2) vyšly se stejným výsledkem zamítající nulovou hypotézu o normálním rozdělení.

Pro ANOVA test byla porušena podmínka o normalitě dat, proto už není třeba testovat shodu rozptylů.

Modifikace hypotéz:

$$H_0: x_{0,5_{Ba1}} = x_{0,5_{Ba2}} = x_{0,5_{Du}} = x_{0,5_{St1}} = x_{0,5_{St2}}$$

$H_A$ :  $H_0$  neplatí

## 2. KRUSKALL-WALLIS test

P-Value <  $\alpha$  ... nulová hypotéza se zamítá. Střední vzdálenost od ideální pozice nemocných pacientů nejsou srovnatelné.

## 3. Post hoc analýza

Statisticky významný rozdíl není mezi žádnými soubory dat pacientů pro střední rozdíly y souřadnic COP pozic.

**$H_{023}$ : Střední vzdálenost od ideální pozice mezi nemocnými a zdravými pacienty jsou srovnatelné.**

$$\mu_{zdravi} = \mu_{nemocni}$$

**$H_{A23}$ : Střední vzdálenost od ideální pozice zdravých pacientů je menší než střední vzdálenost od ideální pozice nemocných pacientů.  $\mu_{zdravi} < \mu_{nemocni}$**

## 1. Ověření normality a stanovení hodnot pro testování:

Z předchozího testování a existence výrazných odlehklých pozorování je již známo, že data nepochází z normálního rozložení. Proto budou k testování určeny mediány.

Mediány (viz Kapitola 6.3) se stanovily pro všechna měření každého pacienta a následně medián pro každého pacienta z těchto mediánů. Tímto vznikla tabulka o dvou sloupcích a 5 řádcích (5 zdravých a 5 nemocných pacientů) reprezentující vztah mezi zdravými a nemocnými pacienty (Tabulka 11).

vzdal_meanZ	vzdal_meanN
3,3226	9,3354
4,9369	10,7909
3,9167	9,5869
1,6514	16,4495
2,4919	8,0988

**Tabulka 11: Mediány mediánů pro vzdálenost COP od ideální pozice (Z-zdraví, N-nemocní)**

Modifikace hypotéz:

$$H_0: x_{0,5_{zdravi}} = x_{0,5_{nemocni}}$$

$$H_A: x_{0,5_{zdravi}} < x_{0,5_{nemocni}}$$

## 2. Intervalový odhad

Intervaly spolehlivosti pro prostřední hodnotu (medián), ve kterém se objevuje 95% hodnot:

Zdraví pacienti: 95,0% confidence interval for mean: 3,2639 +/- 1,57362 [1,69028;4,83752]

Nemocní pacienti: 95,0% confidence interval for mean: 10,8523 +/- 4,06238 [6,78992;14,9147]

## 3. WILCOXON test

Pomocí Wilcoxon neparametrického testu lze porovnat mediány dvou vzorků. Tento test je založen na spojení dvou souborů dat seřazených od nejmenší po největší, a porovnávání jejich průměrných hodnot. Velikost p-Value vzhledem k hladině spolehlivosti  $\alpha$  se nulová hypotéza zamítá (p-Value  $< \alpha$ , nebo přijímá p-Value  $> \alpha$ ,  $\alpha=0.05$ ) [8]

Srovnání mediánů vzdálenosti COP od ideální pozice: p-Value  $< \alpha$  ...  $H_0$  se zamítá - střední vzdálenost COP od ideální pozice je u zdravých pacientů menší než u nemocných (Tabulka 12)

```
Comparison of Medians
-----
Median of sample 1: 3,3226
Median of sample 2: 9,5869

Mann-Whitney (Wilcoxon) W test to compare medians

Null hypothesis: median1 = median2
Alt. hypothesis: median1 < median2

Average rank of sample 1: 3,0
Average rank of sample 2: 8,0

W = 25,0   P-value = 0,00609289
```

**Tabulka 12: Wilcoxon test - vzdálenost COP od ideální pozice (median1-zdraví, median2-nemocní)**

**$H_{024}$ : Střední vzdálenost dvou pozic mezi nemocnými a zdravými pacienty jsou srovnatelné.**

$$\mu_{zdravi} = \mu_{nemocni}$$

**$H_{A24}$ : Střední vzdálenost dvou pozic zdravých pacientů je menší než střední vzdálenost dvou pozic zdravých pacientů.  $\mu_{zdravi} < \mu_{nemocni}$**

1. Ověření normality a stanovení hodnot pro testování:

Z předchozího testování a existence výrazných odlehlých pozorování je již známo, že data nepochází z normálního rozložení. Proto budou k testování určeny mediány.

Modifikace hypotéz:

$$H_0: x_{0,5_{zdravi}} = x_{0,5_{nemocni}}$$

$$H_A: x_{0,5_{zdravi}} < x_{0,5_{nemocni}}$$

2. Intervalový odhad

Intervaly spolehlivosti pro prostřední hodnotu (medián), ve kterém se objevuje 95% hodnot:

Zdraví pacienti: 95,0% confidence interval for mean: 0,124853 +/- 0,0281702  
[0,0966826;0,153023]

Nemocní pacienti: 95,0% confidence interval for mean: 0,49867 +/- 0,256605 [0,242065;0,755275]

3. WILCOXON test

Srovnání mediánů vzdálenosti dvou COP pozic: p-Value <  $\alpha$  ...  $H_0$  se zamítá - střední vzdálenost dvou COP pozic je u zdravých pacientů menší než u nemocných.

**$H_{026}$ : Střední délka dráhy mezi nemocnými a zdravými pacienty jsou srovnatelné.**

$$\mu_{zdravi} = \mu_{nemocni}$$

**$H_{A26}$ : Střední délka dráhy zdravých pacientů je menší než střední délka dráhy zdravých pacientů.**

$$\mu_{zdravi} < \mu_{nemocni}$$

1. Ověření normality a stanovení hodnot pro testování:

Z předchozího testování a existence výrazných odlehlých pozorování je již známo, že data nepochází z normálního rozložení. Proto budou k testování určeny mediány.

Modifikace hypotéz:

$$H_0: x_{0,5_{zdravi}} = x_{0,5_{nemocni}}$$

$$H_A: x_{0,5_{zdravi}} < x_{0,5_{nemocni}}$$

## 2. Intervalový odhad

Intervaly spolehlivosti pro střední hodnotu (medián), ve kterém se objevuje 95% hodnot:

Zdraví pacienti: 95,0% confidence interval for mean: 221,481 +/- 50,9958 [170,485;272,477]

Nemocní pacienti: 95,0% confidence interval for mean: 990,001 +/- 554,356 [435,645;1544,36]

## 3. WILCOXON test

Srovnání mediánů dráhy COP: p-Value <  $\alpha$  ...  $H_0$  se zamítá - střední délka dráhy COP při vyšetření je u zdravých pacientů menší než u nemocných.

## 8.1 Shrnutí výsledků testování

Základním předpokladem pro testování dat je zkoumání jejich normality. Data pacientů z vyšetření na posturometrické plošině obsahuje až 1500 hodnot, což při zkoumání normality vykazuje v součtu odchylek v porovnání s Gaussovou křivkou (graf rozložení hustoty) velký rozdíl. Také díky výrazným odlehklým pozorováním nedochází ke shodě a tak zkoumaná biometrická data nepocházejí ze souboru s normálním rozložením.

Z důvodu anormality dat nelze použít parametrický test ANOVA pro testování shody středních hodnot, ale je třeba užít test KRUSKAL-WALLIS určený pro neparametrické testování mediánů.

První testovaná hypotéza se týkala nutnosti šestinásobného opakování měření na posturometrické plošině a možnosti redukce počtu opakování. Byla stanovena nulová hypotéza o rovnosti mediánů ( $H_0: x_{0.5_1} = x_{0.5_2} = x_{0.5_3} = x_{0.5_4} = x_{0.5_5} = x_{0.5_6}$ ) o vyrovnanosti výsledků jednotlivých měření a byla potvrzena u všech zdravých pacientů pro vypočítané charakteristické veličiny *difference souřadnic x* a *úhel mezi dvěma body COP vzhledem k ideální pozici*.  $H_0$  byla přijata také pro *difference souřadnic y* pro dva zdravé pacienty (Ha a No). U všech nemocných pacientů se přijímá tato nulová hypotéza pouze pro veličinu *difference souřadnice y*. Pro *úhel mezi dvěma body COP vzhledem k ideální pozici* se hypotéza přijímá pro tři pacienty (Ba2, Du a St1). Pro ostatní veličiny zdravých a nemocných pacientů se nulová hypotéza zamítá a přijímá se hypotéza alternativní - při porovnávání mediánů charakteristických veličin jednotlivých měření pacientů není srovnání.

V případě zamítnutí nulové hypotézy následuje testování ověřující vztah mezi jednotlivými soubory dat - tzv. *Post hoc* analýza, která navzájem srovnává mediány a určuje statisticky významný rozdíl mezi nimi. Dle výsledků *Post hoc* analýzy dochází k zamítnutí nulové hypotézy.

Další testovací hypotézy byly sestaveny pro porovnání mediánů jednotlivých veličin mezi všemi zdravými a mezi všemi nemocnými pacienty. Jelikož se v předchozí hypotéze o srovnatelnosti jednotlivých měření u pacientů neprokázalo, že lze 6 měření nahradit jen jedním, nové testované soubory dat obsahují až 9000 hodnot (data jednoho pacienta pro jednu

charakteristickou veličinu obsahují data ze všech 6 měření). Normalita takto rozsáhlého souboru se posuzovala dle testu šikmosti a špičatosti, který je v programu STATGRAPHICS součástí testu normality. Obvykle používaný SHAPIRO-WILKS test nebyl možný kvůli velkému množství vstupních dat. Hypotéza o normalitě dat byla zamítnuta, data nepochází ze souboru s normálním rozložením.

Pro každou veličinu byla stanovena nulová hypotéza o rovnosti mediánů  $x_{0.5_1} = x_{0.5_2} = x_{0.5_3} = x_{0.5_4} = x_{0.5_5}$  (indexy 1-5 reprezentují jednotlivé zdravé/nemocné pacienty). Tato hypotéza se přijímá pro zdravé pacienty jen v případě *diference souřadnice x*. Přestože byla nulová hypotéza zamítnutá pro všechny ostatní veličiny popisující posturometrické měření zdravých pacientů, *Post hoc* analýza prokázala významné statistické rozdíly mezi pacienty u veličin *vzdálenost bodů od ideální pozice* a *vzdálenost mezi dvěma následujícími body*. K zamítnutí nulové hypotézy pro *úhel mezi dvěma body COP* vzhledem k *ideální pozici*, *celkovou dráhu COP* a *diference souřadnice y* v souboru zdravých pacientů došlo z důvodu výrazných odlehlých pozorování. Výsledek testování vzdálenosti bodů od *ideální pozice* a *vzdálenosti mezi dvěma následujícími body* u nemocných pacientů byl stejný jako u zdravých pacientů a stejného výsledku dosáhlo i testování *celkové dráhy COP* nemocných pacientů.

*Post hoc* analýza ukázala významné statistické rozdíly mezi všemi pacienty. Testování nulové hypotézy o rovnosti mediánů nemocných pacientů pro *úhel mezi dvěma COP body* vzhledem k *ideální pozici* a *diference souřadnice y* vyšlo se zamítnutím této hypotézy, avšak *post hoc* analýza neprokázala žádné významné statistické rozdíly, mediány se statisticky shodují, k zamítnutí hypotézy došlo z důvodů výrazných odlehlých pozorování.

Pro porovnání zdravých a nemocných pacientů bylo třeba určit vhodné statistické kritérium, které bude charakterizovat příslušnou veličinu jednou číselnou hodnotou pro každého zdravého a nemocného pacienta. Vzhledem k charakteristice dat (anormalita, odlehlá pozorování) byl zvolen medián. Pro jednotlivého pacienta byl určen medián z každého měření a z těchto mediánů byl určen „hlavní“ medián, který reprezentuje veličinu jednoho pacienta. Následuje testování hypotéz, zda jsou mediány zdravých pacientů rovny nemocných ( $H_0: x_{0.5_{zdravi}} = x_{0.5_{nemocni}}$ ) proti alternativní hypotéze - mediány zdravých pacientů veličin jsou menší než u nemocných pacientů ( $H_A: x_{0.5_{zdravi}} < x_{0.5_{nemocni}}$ ).

Určení intervalových odhadů pro *vzdálenost bodů od ideální pozice*, *vzdálenost dvou následujících bodů* a *celkovou dráhu* u zdravých a nemocných pacientů již deklaruje zamítnutí nulové hypotézy o rovnosti mediánů. Wilcoxonův test mediánů prokázal, že pro zdravé pacienty je intervalové rozpětí menší než pro nemocné a tedy původně stanovená nulová hypotéza o rovnosti mediánů veličin *vzdálenost bodů od ideální pozice*, *vzdálenost dvou následujících bodů* a *celkovou dráhu* byla zamítnuta a v platnost přišla alternativní hypotéza; mediány výše uvedených veličin zdravých pacientů jsou menší než mediány nemocných pacientů.



## 9 Závěr

Tato práce je zaměřena na statistickou analýzu posturometrických dat získaných ve spolupráci s Centrem pro poruchy sluchu a rovnováhy v Ostravě – Porubě. Soubor dat byl získán na stabilometrické plošině Otometrics – Balance Platform a obsahoval data pěti náhodně vybraných zdravých pacientů a pěti náhodně vybraných pacientů s diagnostikovanou poruchou rovnovážného ústrojí.

Protože výrobcem dodávaný software VestLab neumožňuje export binárně uložených měřených dat do souboru, jehož formát by byl vhodný pro pokročilejší statistické metody a protože výrobce systému, firma Otometrics, po předešlém ústním souhlasu lékaře, nebyl ochoten poskytnout organizační schéma tohoto binárního souboru, bylo nutné vyvinout vlastní dekodovací nástroj v prostředí MATLAB.

Pro extrahovaná data byl zvolen soubor charakteristických veličin: *celková dráha*, *vzdálenost dvou sousedních bodů COP*, *vzdálenost od ideální pozice*, *úhel mezi dvěma body COP od ideální pozice*, *diference x souřadnice* a *diference y souřadnic*. Tyto veličiny byly podrobeny statistické analýze pro objektivní nastavení kritérií pro posouzení zdravotního stavu pacienta. Vzhledem k četným odlehlým pozorováním a zamítnutí hypotézy o normalitě dat se v testování hypotéz používá neparametrický Kruskal-Wallis test, popř. Wilcoxon test.

První testovaná hypotéza o rovnosti mediánů se týkala nutnosti šesti posturometrických měření u každého pacienta a možnosti redukce opakování pro zkrácení vyšetřovacího času. Tato hypotéza byla potvrzena testem pro všechny zdravé pacienty pouze u veličiny *diference x souřadnice* a pro všechny nemocné pacienty u *diference y souřadnice*. Pro ostatní charakteristické veličiny se nedosáhlo shody mezi jednotlivými měřeními u všech pacientů, nebo se shodují jen u některých pacientů ze zdravých či nemocných. Ukázalo se tedy, že opakování měření vede k získu nových informací a je tedy vhodné provádět alespoň 6 standardních posturometrických měření, které jsou nabízeny přístrojem a všechny je zohlednit při posuzování zdravotního stavu pacienta.

Druhá hypotéza se týkala testování mediánů charakteristických veličin v rámci souboru zdravých a nemocných pacientů. Hypotézy byly podrobeny Kruskal-Wallis testu, který u zdravých pacientů vedl k zamítnutí nulové hypotézy pro všechny charakteristické veličiny s výjimkou veličiny *diference x souřadnice*. Zamítnutí nulové hypotézy pro charakteristické veličiny pro soubor nemocných pacientů má souvislost s různou úrovní dysfunkce rovnovážného aparátu jednotlivých vyšetřovaných pacientů.

Podstatný výsledek byl dosažen testováním mediánu mediánů každé charakteristické veličiny pro všechny pacienty a stanovení nulové hypotézy o rovnosti mediánu mediánů příslušné charakteristické veličiny pro soubor zdravých a nemocných pacientů. Následné zamítnutí nulové hypotézy pro celý soubor charakteristických veličin tak představuje vhodné posuzovací kritérium pro posuzování (dis) funkce rovnovážného aparátu pacienta. Tento výsledek byl opětovně potvrzen Wilcoxon testem a určením intervalových odhadů pro veličiny *vzdálenost bodů od ideální pozice*,

*vzdálenost dvou následujících bodů a celkovou dráhu.* Intervalový odhad mediánů výše zmíněných veličin pro zdravé pacienty obsahuje menší hodnoty než intervalový odhad pro nemocné pacienty.

Tato diplomová práce je pilotní studií. V práci byly stanoveny nové parametry, které popisují chování pacienta při vyšetřování rovnováhy. Těmito charakteristickými veličinami lze popsat každého pacienta a po ověření hypotéz na větším počtu pacientů lze tyto teorie aplikovat v praxi.

## 10 Použitá literatura

- [1] MRÁZKOVÁ, E., MRÁZEK, J., LINDOVSKÁ, M. *Základy audiologie a objektivní audiometrie. Medicínské a sociální aspekty sluchových vad.* Ostrava: Repronis Ostrava, 2006. 121 s. ISBN 80-7368-226-5.
- [2] ČIHAK, R. *Anatomie* Praha : Grada, 2004. ISBN 80-247-1132 – X.
- [3] VRABEC, P., LISCHKEOVÁ, B., SKŘIVAN, J., ČERNÝ, R., TRUC, M. *Rovnovážný systém II - speciální část* Praha: Triton 2007. ISBN 978-80-7387-050-8
- [4] NOGOVÁ, I., *Vestibulární rehabilitace: Bakalářská práce*, Ostrava: Ostravská Univerzita, Zdravotně sociální fakulta, 2008
- [5] BURA, Mauro, *Progetto e realizzazione di pedana dinamometrica: Diplomová práce*, Řím: Università degli Studi di Roma Tre, 2005
- [6] KADLEC, Karel, *Snímače tlaku - principy, vlastnosti a použití (část 2)*, ([http://web.vscht.cz/kadleck/aktual/MT\\_INaRP/Tlak2\\_au070725.pdf](http://web.vscht.cz/kadleck/aktual/MT_INaRP/Tlak2_au070725.pdf)) (14.11.2010)
- [7] LITSCHMANNOVÁ, Martina, *Vybrané kapitoly z pravděpodobnosti: skriptum*, Ostrava: VŠB-TUO Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2011
- [8] LITSCHMANNOVÁ, Martina, *Úvod do statistiky: skriptum*, Ostrava: VŠB-TUO Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2011
- [9] KUTÁ, S., *Evokované potenciály sluchové dráhy: bakalářská práce*, Ostrava: VŠB-TUO, 2008
- [10] OTOMETRICS, *Operator's manual Balnace platform*
- [11] [http://www.otometrics.com/balanceassessment/Balance\\_Platform/Balance\\_Platform.asp](http://www.otometrics.com/balanceassessment/Balance_Platform/Balance_Platform.asp) (14.11.2010)
- [12] CONFORTO, Silvia, *Elementi per l'acquisizione dei segnali: přednáška*, Řím: Università degli Studi di Roma Tre, říjen 2009
- [13] [http://www.e-automatizace.cz/ebooks/mmv/tlak/tlak\\_tlakomery\\_elektricke.htm](http://www.e-automatizace.cz/ebooks/mmv/tlak/tlak_tlakomery_elektricke.htm) (14.11.2010)
- [14] <http://www.vtsz.cz/polovodicove-tenzometry.php> (14.11.2010)
- [15] POKORNÝ, M., TIEFENBACH, P., PETRÁNEK, P., ŠÍŠPERA, P., *Měřicí systémy: skriptum*, Ostrava: VŠB-TUO, 2004
- [16] MOHYLOVÁ J., KRAJČA V.: *Zpracování biologických signálů: skriptum*, Ostrava: VŠB-TUO, 2009, ISBN 978-80-248-1491-9